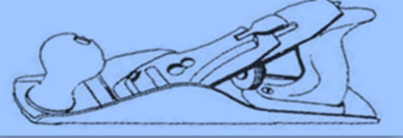


MOBİLYA ve AHŞAP MALZEME ARAŞTIRMALARI DERGİSİ



-MAMAD-



Sayı yayın tarihi: 28.12.2025

2025 - 8(2), 204-499

Issue publication date: 28.12.2025



FURNITURE and WOODEN MATERIAL RESEARCH JOURNAL





BAŞ EDITÖR ve İMTİYAZ SAHİBİ / EDITOR-IN-CHIEF and CONCESSIONAIRE

Prof. Dr. Bekir Cihad BAL, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye

EDITÖR KURULU - EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Murat ÖZALP, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye
Doç. Dr. Erkan AVCI, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye
Doç. Dr. Nasır NARLIOĞLU, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye
Prof. Dr. Petar ANTOV, University of Forestry, Bulgaria
Prof. Dr. Vassil JIVKOV, University of Forestry, Sofia, Bulgaria
Assist. Prof. Dr. Agnieszka JANKOWSKA, Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Warsaw, Poland
Assoc. Prof. Dr. Seyyed Khalil HOSSEINIHASHEMI, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran
Assoc. Prof. Dr. Emilia-Adela SALCA, Transilvania University of Brasov, Romania
Senior Lecturer Dr. Lee Seng HUA, Universiti Teknologi MARA (UITM), Malaysia

DANIŞMA KURULU - ADVISORY BOARD

Prof. Dr. Abdülkadir MALKOÇOĞLU, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye
Prof. Dr. Ahmet KURTOĞLU, Doğu University, İstanbul, Türkiye
Prof. Dr. Bruno ESTEVES, Polytechnic Institute of Viseu, Portugal
Prof. Dr. Cevdet SÖĞÜTLÜ, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye
Prof. Dr. Marko PETRIC, University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia
Prof. Dr. Mehmet Hakkı ALMA, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye
Prof. Dr. Pavlo BEKHTA, Ukrainian National Forestry University, Ukraine
Prof. Dr. Petar ANTOV, University of Forestry, Bulgaria
Prof. Dr. Sait Dünder SOFUOĞLU, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye
Prof. Dr. Tuncer DİLİK, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İstanbul, Türkiye
Prof. Dr. Vassil JIVKOV, University of Forestry, Sofia, Bulgaria
Assoc. Prof. Dr. Abdurrahman KARAMAN, Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Alperen KAYMAKÇI Kastamonu Üniversitesi, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Fatih Tuncay EFE, Çanakkale, Onsekiz Mart University, Türkiye
Assist. Prof. Dr. Agnieszka JANKOWSKA, Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Warsaw, Poland
Assoc. Prof. Dr. Emilia-Adela SALCA, Transilvania University of Brasov, Romania
Assoc. Prof. Dr. Milan GAFF, Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic
Assoc. Prof. Dr. Önder TOR, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Seyyed Khalil HOSSEINIHASHEMI, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran
Assist. Prof. Dr. Emine Banu BURKUT, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
Assist. Prof. Dr. Füsün CURAOĞLU, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye
Assist. Prof. Dr. Tomasz KRYSTOFIAK, Poznań University of Life Sciences, Poland
Senior Lecturer Dr. Lee Seng HUA, Universiti Teknologi MARA (UITM), Malaysia
Ph.D. Juanito P. JIMENEZ, Jr., Forest Products Research and Development Institute (FPRDI), Philippines

DİL EDITÖRÜ – LANGUAGE EDITOR

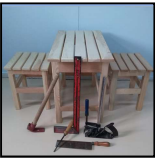
Zeynep NARLIOĞLU, İngiliz Edebiyatı ve Beşeri Bilimler, Türkiye



İÇİNDEKİLER - CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ - RESEARCH ARTICLES

- Panel mobilya birleştirmeleri için inovatif bağlantı elemanı tasarımı ve performansı**
Innovative fastener design and its performance for panel furniture joints 204-219
*Ali Kasal , Sadullah Sayarcan , Tolga Kuşkun**
- 3B yazıcıda farklı baskı yönlerinde üretilen PLA ve PLA-Wood civatalarının mekanik özelliklerinin incelenmesi**
Investigation of the mechanical properties of PLA and PLA-wood bolts fabricated via 3D printing with different print orientations 220-235
Abdulsamed Arık , Nergizhan Anaç, Vahap Neccaroğlu , Oğuz Koçar, Ali Ulaş Gümüşlüoğlu , Hikmet Sefa Dönmez*
- Influence of carbon nanotubes on physical and mechanical properties of polypropylene/reed flour hybrid nano WPC**
Polipropilen/kamış unu hibrit nano WPC'nin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine karbon nanotüplerin etkisi 236-248
Seyyed Khalil HosseiniHashemi1 , Maryam Jamshidi , Behzad Kord , Eshmaiel Ganjian , Ahmad Ehsani , Nadir Ayırmis*
- Furniture reuse: Institutional models in Turkey and Europe**
Mobilyaların yeniden kullanımı: Türkiye ve Avrupa'da kurumsal modeller 249-264
Gizem Büke Öztürk
- Determination of dielectric properties in oriental beech (Fagus orientalis Lipsky) wood**
Doğu kayını (Fagus orientalis Lipsky.) odununda dielektrik özelliklerinin belirlenmesi 265-280
Beytullah Bozali
- Tarihi bir caminin ahşap tavan elemanlarında malzeme analizi: ağaç türü, böcek hasarı ve higroskopik davranış**
Material analysis of wooden ceiling elements of a historical mosque: wood species, insect damage, and hygroscopic behaviour 281-294
Elif Topaloğlu, Murat Öztürk , Derya Ustaömer ,Mesut Yalçın*
- Mobilya endüstrisinde MDF levhalarda yüzey pürüzlülüğü ve yapışma performansına kesim parametrelerinin etkileri**
Effects of cutting parameters on surface roughness and adhesion performance of MDF panels in the furniture industry 295-306
İzham Kılınc
- Enhancing operational efficiency of sawmills in Sri Lanka's state timber sector**
Sri Lanka devlet kereste sektöründeki kereste fabrikalarının operasyonel verimliliğinin artırılması 307-320
*Pathmasiri Bandara , Chaminda Kumara Muthumala , Tharindu Dilan Amarasinghe , Faiz Mohideen Mohamed Thassim Marikar**
- Alçak yoğunluklu polietilen ve yüksek yoğunluklu polietilen karışımının bazı fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine atık MDF**
Effect of waste MDF powder on some physical and mechanical properties of blend of low density polyethylene and high density polyethylene 321-333
*Bekir Cihad Bal**
- 3B yazıcı ile üretilen mobilya kulplarının performansının incelenmesi**
Investigation of the performance of furniture handles produced by 3D printing 334-344
Sedanur Şeker
- The orientation of growing in black pine wood, heat treatment and alpha-x chemical examination of the effects**
Karaçam odununda yetiştirme yönü, ısıtma işlemi ve alfa-x kimyasalının etkilerinin incelenmesi 345-357
Kemal Güler , Murat Özalp , Abdurrahman Karaman
- Emprenye ve ısıtma işlemi karaçam (Pinus nigra) ağacının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkileri**
Effects of impregnation and heat treatment on the physical and mechanical properties of black pine (Pinus nigra) wood 358-372
Bilal Doğan , Osman perçin
- Evaluation of the wood machining characteristics and performance of Melia azedarach L. for furniture**
Melia azedarach L. odununun mobilya üretimi için ahşap işleme özelliklerinin ve performansının değerlendirilmesi 373-388
*Alvin F. VardeleonI, Juanito P. Jimenez, Jr. *, Oswald David F. Ilagan , Edward Paul S. Marasigan*
- A perceptual impact model of material, quality, and identity in wood furniture consumers' value associations**
Ahşap mobilya tüketicilerinin değer ilişkilerinde malzeme, kalite ve kimliğin algısal etki modeli 389-403
Andrea Reményi
- Hybrid making in furniture design education: bridging digital fabrication and craft through experiential learning**
Mobilya tasarımı eğitiminde hibrit yapımlar: dijital üretim ile zanaat arasında köprü kurmak 404-419
*Hande Atmaca**



Influence of resin content on the properties of particleboard made from different parts of oil palm biomass

Yağ palmiyesi biyokütlesinin farklı kısımlarından yapılan yonga levhanın özellikleri üzerindeki reçine içeriğinin etkisi

Nurrohana Ahmad , Siti Noorbaini Sarmin , Lee Seng Hua1 , Yusri Helmi Muhammad , Wan Mohd Nazri Wan Abdul Rahman , Nur Sakinah Mohamed Tamat*

420-429

Non-destructive assessment of dynamic properties of acetylated beech wood (*Fagus orientalis* L.) under varying

*Değişen emprenye ve reaksiyon süreleri altında asetillenmiş kayın odununun (*Fagus orientalis* L.) dinamik özelliklerinin tahribatsız değerlendirilmesi*

Seyyed Khalil HosseiniHashemi , Mojtaba Esfandiyar*

430-444

Çam, kayın ve huş kaplama ile güçlendirilmiş kavak kontrplağın bazı mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi

Evaluation of some mechanical properties of poplar plywood reinforced with pine, beech and birch veneer

Vedat Çavuş , Bekir Cihad Bal*

445-455

DERLEME MAKALELER - REVIEW ARTICLES

Circular design strategies in interior architecture: rethinking furniture design through reuse, recycling, and waste materials

İç mimarlıkta döngüsel tasarım stratejileri: yeniden kullanım, geri dönüşüm ve atık malzemelerle mobilya tasarımı yeniden düşünmek

Emine Banu Burkut

456-470

Ahşap ve çelik malzemenin bükme mobilyada kullanımı: literatür incelemesi

Use of wood and steel materials in bending furniture: literature review

Feyza Mendi , Ayşe Seda Çalışkan , Onur Ülker*

471-486

Brief review of bamboo particle-based composites: parameter and performances

Bambu parçacık bazlı kompozitlerin kısa bir incelemesi: parametre ve performanslar

Juliana Abdul Halip , Mohd Nazrul bin Roslan , Azrin Hani Abdul Rashid , Noor Aslinda Abu Seman , Nurazwa Ahmad , Ambigaipagan Nagasamy*

487-499



Panel mobilya birleştirmeleri için inovatif bağlantı elemanı tasarımı ve performansı

Ali Kasal¹, Sadullah Sayarcan¹, Tolga Kuşkun^{1*}

ÖZ: Bu çalışmada, panel mobilyalar için dışardan görünmeyen, montajı kolay ve pratik, inovatif bir bağlantı elemanı tasarlanması, üç boyutlu yazıcı teknolojisiyle üretilmesi, performansının değerlendirilmesi ve piyasada mevcut kullanılan minifiksli birleştirmeye karşılaştırılması amaçlanmıştır. Araştırma kapsamında, 2 farklı boy (40 ve 50 mm) ve kesit yapısında (boşluksuz, boşluklu) olmak üzere, 4 farklı kombinasyonda inovatif bağlantı elemanı tasarımları geliştirilmiş ve üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Köşe birleştirmelerinin üretiminde yonga levha, bağlantı elemanlarının üretiminde ise polilaktik asit (PLA), akrilonitril stiren akrilat (ASA) ve polietilen tereftalat glikol (PETG) filamentleri kullanılmıştır. Daha sonra, bu bağlantı elemanlarıyla birleştirilen L-tipi köşe birleştirmeler, statik diyagonal basınç ve çekme yükleri altında test edilmiş ve moment taşıma kapasiteleri ile elastikiyetleri belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, en yüksek mukavemet PLA veya ASA filamentten boşluksuz olarak üretilmiş 45 mm uzunluğundaki bağlantı elemanlarıyla elde edilmiştir. Moment kapasitesi üzerinde bağlantı elemanı malzemesinin; elastikiyet üzerinde ise bağlantı elemanı kesit yapısının belirgin etkisi görülmüştür. Deneyler sonucunda, tasarlanan bağlantı elemanlarıyla birleştirilmiş deney örneklerinin minifiksli birleştirilmiş örneklerin ortalama %73'ü kadar mukavemete sahip olduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Mobilya köşe birleştirmeleri, İnovatif bağlantı elemanı, Panel mobilya

Innovative fastener design and its performance for panel furniture joints

ABSTRACT: In this study, it was aimed to design innovative fastener that is invisible from the outside, easy to assemble and practical for panel furniture, to produce it with three-dimensional printing technology and to evaluate the performance and to compare it with minifix joint. Innovative fastener designs in 4 different combinations, including 2 different lengths and cross-section, were developed within the scope of the study, and produced with a three-dimensional printer. In production of corner joints, particleboard was used, and in production of fasteners, polylactic acid (PLA), acrylonitrilestyrene acrylate (ASA) and modified polyethylene Terephthalate glycol (PETG) were used. L-type corner joints connected with these fasteners were tested under static diagonal compression and tension loads. Their moment capacities and stiffness were determined. According to results, the highest strength was obtained with 45 mm long fasteners produced full cross-section from PLA or ASA filament. Fastener material had significant effect on moment capacity, fastener cross-section structure had significant effect on stiffness. As a result, it was observed that specimens connected with designed fasteners had an average strength of 73% of the minifix connected specimens.

Keywords: Furniture corner joints, Innovative fastener, Panel type furniture

1 Giriş

Mobilya tasarımı, mühendislik açısından farklı yapısal özelliklere sahip üç ana grupta sınıflandırılabilir. Bunlar; iskelet tipi, panel tipi ve kombine (karma) konstrüksiyonlu mobilyalardır. Panel tipi mobilyalar, genellikle tablaların birleşiminden oluşan ürünlerdir. İskelet tipi mobilyalar ise daha sağlam çerçevelerle yapılan, genellikle daha dayanıklı yapıları ifade eder. Kombine mobilyalar ise her iki yapı türünü birleştirerek hem estetik hem de fonksiyonel bir denge oluşturur. Bu farklı yapılar, mobilyaların kullanım amacına ve üretim tercihlerine göre şekillenir (Örs ve Efe, 1998; Eckelman, 2003).

Mobilya üretiminde, başarılı bir tasarım süreci için üç temel alanın dikkate alınması gerekir. İlk olarak, fonksiyonel tasarım; mobilyanın kullanım amacına uygunluk sağlamalı ve kullanıcıların ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılamalıdır. İkinci olarak, estetik tasarım, bir ürünün görsel açıdan çekici olmasını sağlamakla ilgilidir. Burada, moda, kültürel etkiler ve kullanıcı tercihlerinin yanı sıra renk, biçim, doku gibi unsurlar da göz önünde bulundurulur. Son olarak, mühendislik tasarımı, mobilyanın üretiminde kullanılan malzeme ve tekniklerin, en verimli şekilde belirlenmesini içerir. Bu süreç, mobilyanın teknik, ekonomik ve estetik gereksinimlerinin bir arada düşünülerek bilimsel bir temele dayandırılmasını sağlar. Mühendislik tasarımı, mobilyanın dayanıklılığı, fonksiyonelliği ve uzun ömürlü olmasını garanti etmek için kritik öneme sahiptir (Efe 1994; Eckelman, 2003; Kasal, 2004; Ceylan ve ark., 2024).

Günümüzde, mobilya imalat sektöründe genellikle, depolama, nakliye ve montaj kolaylığı gibi nedenlerle tutkal kullanımı gerektirmeyen ve demonte (sökülüp takılabilen) montaj imkânı sağlayan mekanik bağlantı elemanları (minifiks, multifiks, vida, çektirme vs.) kullanılmaktadır.

Literatürde, panel mobilya köşe birleştirmelerinin mukavemetine ilişkin birçok kriterin değerlendirildiği çalışmalar bağlantı elemanları hakkında detaylı bilgi vermektedir (Eckelman and Rabiej, 1985; Jivkov ve ark., 2005; Tankut, 2009). Bir çalışmada, panel mobilyalar için yeni bir birleştirme elemanı tasarımında uygulanması gereken metodoloji hakkında detaylı bilgiler verilmiş olup köşe birleştirmelerde kullanılan birçok bağlantı elemanı incelenmiş ve bunlar estetik, montaj kolaylığı, araç gereç kullanımı, operasyon sayısı, mukavemet vb. gibi birçok kriter açısından karşılaştırarak değerlendirilmiştir (Podskarbi ve ark., 2017). Ayrıca, yeni inovatif demonte bağlantı elemanlarının tasarlandığı ve bu elemanlarla birleştirilen panel mobilya köşe birleştirmelerinin performansının mevcut eksantirik bağlantı elemanlarıyla karşılaştırıldığı çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların sonucunda yeni tasarlanan bağlantı elemanlarının performanslarının kabul edilebilir düzeyde olduğu bildirilmiştir (Poskarbi ve Smardzewski 2019; Krzyzaniak ve Smardzewski 2021). Diğer bazı çalışmalarda panel mobilya vidalı köşe birleştirmelerinde, optimum vida sayısı, vida çapı ve boyu gibi faktörler belirlenmiş, ayrıca birleştirmelerin performansının tahmin edilmesini sağlayacak matematiksel eşitlikler geliştirilmiştir (Kasal ve ark., 2006; Kasal 2008).

Kavelalı köşe birleştirmelerin diyagonal basınç yükü altındaki moment kapasiteleri belirlenmiştir (Dalvand ve ark., 2014). Benzer bir çalışmada, kelebek şeklindeki bağlantı elemanlı gönyeburun birleştirmeler çeşitli kombinasyonlarda diyagonal çekme ve basınç altında test edilmiş ve elde edilen sonuçlara göre birleştirmelerin dış ve iç kenarlarındaki gerilme konsantrasyonları analiz edilmiştir (Maleki ve ark., 2012a; Dalvand ve ark., 2013). Bir diğer çalışmada ise yabancı çıtalı köşe birleştirmeler diyagonal basınç ve çekme yükleri altında test edilmiş, çalışma sonucunda optimum yabancı çıta ölçüleri ve derinliği belirlenmiş ve MDF örneklerin yonga levhaya üstünlük sağladığı bildirilmiştir (Maleki ve ark., 2012b).

Literatürde gerçekleştirilen bu çalışmalar, gerçekleştirilen tasarım ve üretim süreçleri ile test yöntemleri anlamında literatüre çok önemli katkılar sağlamıştır. Ancak, çoğu bağlantı elemanlarının maliyetleri ve montaj süreçlerinde yaşanan teknik ve ekonomik zorluklar, yeni alternatif bağlantı elemanları tasarlanmasını ve üretilmesini teşvik etmektedir. Özellikle, panel mobilyalar için farklı malzeme ve yöntemler kullanarak yeni birleştirme elemanlarının tasarımı önem arz etmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, günümüzde yeni tasarımların üç boyutlu yazıcılarda modellenmesi ve kolayca üretilmesi yeni bir yöntem olarak karşımıza çıkmakta ve insan aklının sınırları zorlamaktadır.

Üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin geliştirilmesi, tasarlanan ve modellenen her türlü yapısal özellikteki ürünün kolayca üretilabilir olmasına ve insan aklının sınırlarını zorlamasına imkân vermektedir. Üç boyutlu yazıcılar günümüzde, otomotiv, sağlık, mimari ve inşaat, savunma sanayi, eğitim, oyuncak vb. birçok sektörde verimli bir şekilde aktif olarak kullanılmaktadır. Yakın gelecekte, bu teknolojilerin çok daha fazla gelişeceğini ve kullanımının mobilya sektörü de olmak üzere pek çok farklı sektörlere doğru yaygınlaşacağını tahmin etmek çok zor değildir. Birleştirme ve bağlantı elemanlarının tasarımı, mobilya mühendislik tasarımının önemli adımlarından birisidir. Bu sebeple, üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin mobilya bağlantı elemanlarının üretilmesi için kullanılması çok önemli görülmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı; firmalarda üretilen panel mobilyalarda mevcut üretim yöntemlerine alternatif olmak üzere, sağlamlıktan taviz vermeden maliyetleri azaltmak, montaj süresini kısaltmak ve montaj kolaylığı sağlamak amacıyla, dışardan görünmeyen, özgün, inovatif bir bağlantı elemanı tasarımı geliştirmesi ve bu bağlantı elemanının performansının belirlenmesi, mobilya sektöründe yaygın olarak kullanılan mevcut minifiks birleştirme tekniği performansı ile karşılaştırılmasıdır.

2 Materyal ve Metot

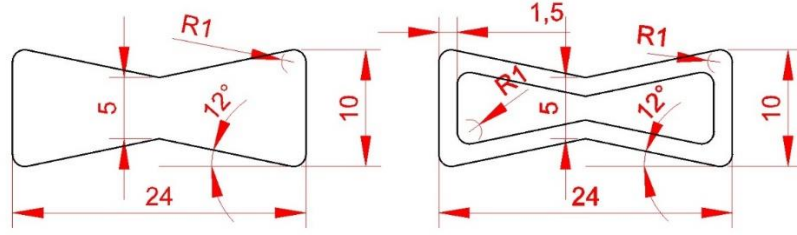
2.1 Materyal

2.1.1 Bağlantı elemanlarının tasarımı, modellenmesi ve üretimi

Çalışma kapsamında, panel mobilyaların üretiminde, köşe birleştirmelerde kullanılan minifiks bağlantı elemanına alternatif olmak üzere bağlantı elemanları tasarlanmış ve üretilmiştir. Bağlantı elemanlarının tasarımında, panel mobilya köşe birleştirmelerinin demonte, montajı kolay ve montaj sırasında herhangi bir araç gerece ihtiyaç duyulmadan bağlantının sağlanması amaç edinilmiştir.

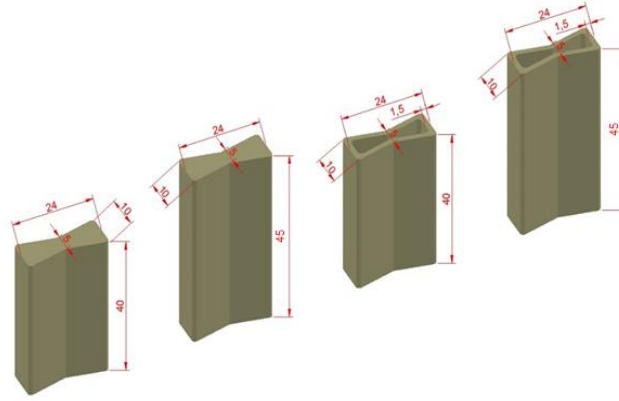
Bağlantı elemanlarının tasarımında, üç boyutlu modelleme işlemleri için “Autocad Inventor” yazılımından yararlanılmış ve panel mobilya üretimi için en uygun teknolojik parametrelere sahip olmasına dikkat edilmiştir. Tasarım çalışmalarında, ağaç işleri ve mobilya sektöründe, çeşitli konstrüksiyon tipine sahip mobilyaların birleştirme işlemlerinde yaygın olarak ve çok eski yıllardan beri bilinen ve kullanılan “kırlangıç kuyruğu” geometrisinden esinlenilmiştir. Bu geometrinin, panel mobilya köşe birleştirmelerinde kullanılabilecek bir bağlantı elemanına uyarlanması esas alınmıştır. Buna göre kırlangıç kuyruğu geometrisine sahip 2 farklı enine kesitte (boşluksuz, boşluklu) bağlantı elemanı tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan bağlantı elemanlarının kırlangıç kuyruğu enine kesitli görünüşleri ve ölçüleri Şekil 1’ de gösterilmiştir.

Boşluksuz ve boşluklu enine kesite sahip bağlantı elemanı tasarlanmasındaki amaç, boşluksuz enine kesite sahip olan bağlantı elemanı ile boşluklu yapıdaki ve daha az malzeme kullanılarak üretilen bağlantı elemanının mukavemet açısından karşılaştırılabilmesidir.



Şekil 1. Boşluksuz ve boşluklu bağlantı elemanlarının enine kesit görünüşleri (ölçüler mm)

Tahmin edilebileceği gibi, boşluklu olan bağlantı elemanı dolu olan bağlantı elemanına göre hem malzeme miktarı hem de üretim süresi açısından çok daha ekonomiktir. Kırılma kuyruğu şeklinde enine kesite sahip olarak tasarlanan bu bağlantı elemanlarında, bağlantı elemanının uzunluğunun belirlenmesi de çözülmesi gereken önemli parametrelerden birisi olarak düşünülmüştür. Çünkü gereksiz uzunlukta üretilen bağlantı elemanlarında üretim malzemesi miktarı artacak ve bu durum maliyeti olumsuz olarak etkileyecektir. Buna göre, bağlantı elemanının tasarımında 2 farklı uzunluk ölçüsü (40 ve 45 mm) ile çalışılmıştır. Tasarlanan 4 farklı kombinasyondaki (boşluklu, boşluksuz, 40 mm, 45 mm) bağlantı elemanlarının perspektif görünüşleri ve detaylı ölçüleri Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Tasarlanan bağlantı elemanlarının 3B modellenmiş görünüşleri ve ölçüleri (mm)

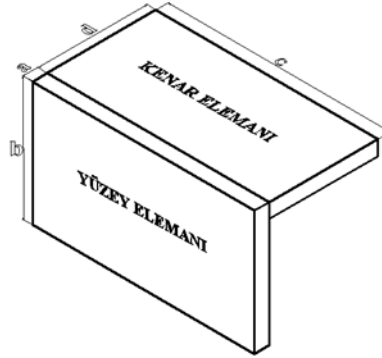
Tasarımı olgunlaştırılan ve üç boyutlu olarak modellenen bağlantı elemanlarının, üç boyutlu yazıcı ile üretilebilmesi için gerekli özelliklere sahip olması sağlanmıştır. Burada, Autocad Inventor programında üç boyutlu olarak modellenen bağlantı elemanları, üç boyutlu yazıcılarda yaygın olarak kullanılan STL (stereolithography) formatına dönüştürülmüştür. Bu aşamadan sonra, oluşturulan üç boyutlu modellere ilişkin dosyalar üç boyutlu yazıcı ile üretilebilir hale getirilmiştir. Bağlantı elemanı üretimleri için, pek çok malzeme araştırılmış, ön denemeler yapılmış ve mevcut yazıcı ile üretilebilecek malzemeler belirlenmiştir. Buna göre, PLA, ASA ve PETG olmak üzere 3 farklı filamentten yararlanılmıştır. Filamentlerinin yoğunlukları ve ASTM D3039/D3039M–17 (2017)’e göre çekme dirençleri ile çekmede elastikiyet modülü değerleri belirlenmiştir. Bağlantı elemanlarının üretiminde, her bir parametre için firma önerilerinde verilen aralıklar dikkate alınmış, ancak bu aralıklardaki en başarılı sonuçların hangi noktalarda alınacağını belirlemek için ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Buna göre üretim için optimum değerler ve testlerle belirlenen çekme dirençleri Çizelge 1’de verilmiştir. Her bir malzemeden olmak üzere 20’şer adet bağlantı elemanı üretilmiştir. Buna göre toplamda 120 adet bağlantı elemanı üretilmiştir. Çalışma kapsamında, 4 farklı konfigürasyon (2 kesit yapısı, 2 uzunluk) ve 3 farklı malzeme olmak üzere toplam 12 farklı bağlantı elemanı grubu denenmek üzere üretilmiştir.

Çizelge 1. 3B yazıcıyla üretiminde kullanılan optimum döküm değerleri

Filament	Nozzle Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Doluluk Oranı (%)	Katman Kalınlığı (mm)	Çekme Direnci (N/mm ²)
PLA	220	70	90	0.1	50
ASA	260	90	90	0.1	39
PETG	240	90	90	0.1	44

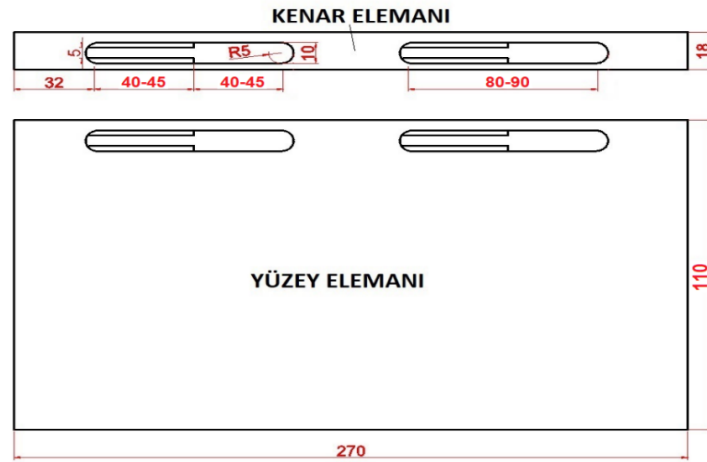
2.1.2 Köşe birleştirme deney örneklerinin hazırlanması ve montajı

Deney örnekleri kenar ve yüzey olmak üzere iki farklı elemandan oluşmaktadır. Kenar elemanı olarak belirtilen yatay eleman 270 x 92 mm, yüzey elemanı olarak belirtilen düşey eleman ise 270 x 110 mm ölçülerindedir (Şekil 3).



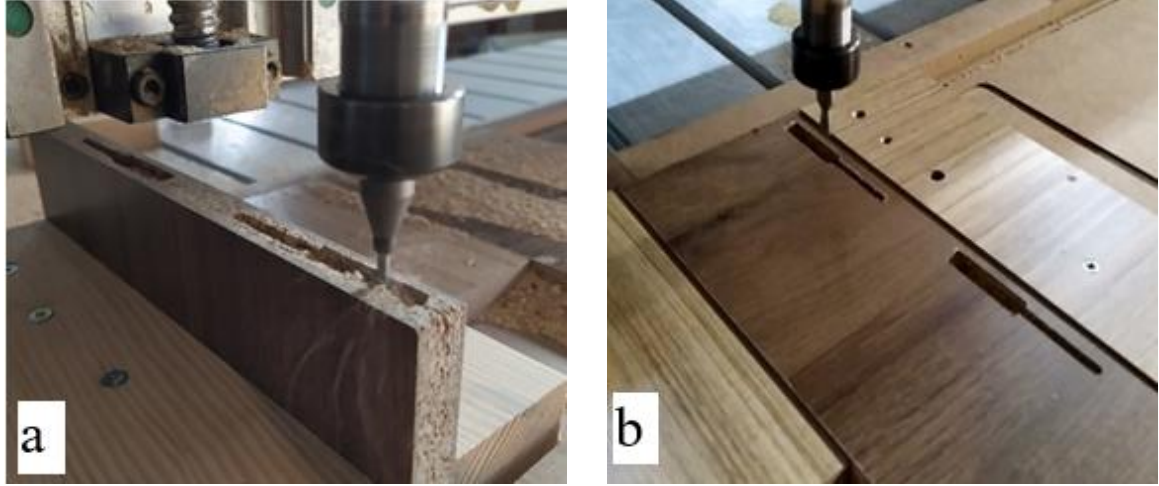
Şekil 3. L-tipi köşe birleştirme deney örneği (Levha kalınlığı 18mm, yüzey elemanı genişliği 110 mm, kenar elemanı uzunluğu 270 mm ve kenar elemanı genişliği 92 mm'dir.)

Birleştirmelerde, iki eleman birbirlerine 2 adet bağlantı elemanı ile bağlanmıştır. Bağlantı elemanlarının yerleştirileceği yerlere önceden gerekli ölçülerde bir tarafı düz bir tarafı kıvrangıç kuyruğu şekline olan kanallar açılmıştır. Bağlantı elemanı eksenleri arasındaki mesafe için çoklu delik makinelerindeki standart ölçü (32 mm) hesaba alınacaktır. Deney örneklerinin birleşme yerlerinin detayı Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Kenar ve yüzey elemanına açılacak kanalların görünüşü ve ölçüleri

Deney örnekleri hazırlanırken öncelikle yüzey ve kenar elemanları için gerekli olan kıvrangıç kuyruğu ve düz kanallar açılmıştır. Bu kanallar bilgisayarlı nümerik kontrol (CNC) makinesinde açılmıştır. Kenar elemanına açılan kanallar Şekil 5a' da, yüzey elemanına açılan kanallar Şekil 5b' de gösterilmiştir.



Şekil 5. Kenar (a) ve yüzey (b) elemanlarına açılan kanallar

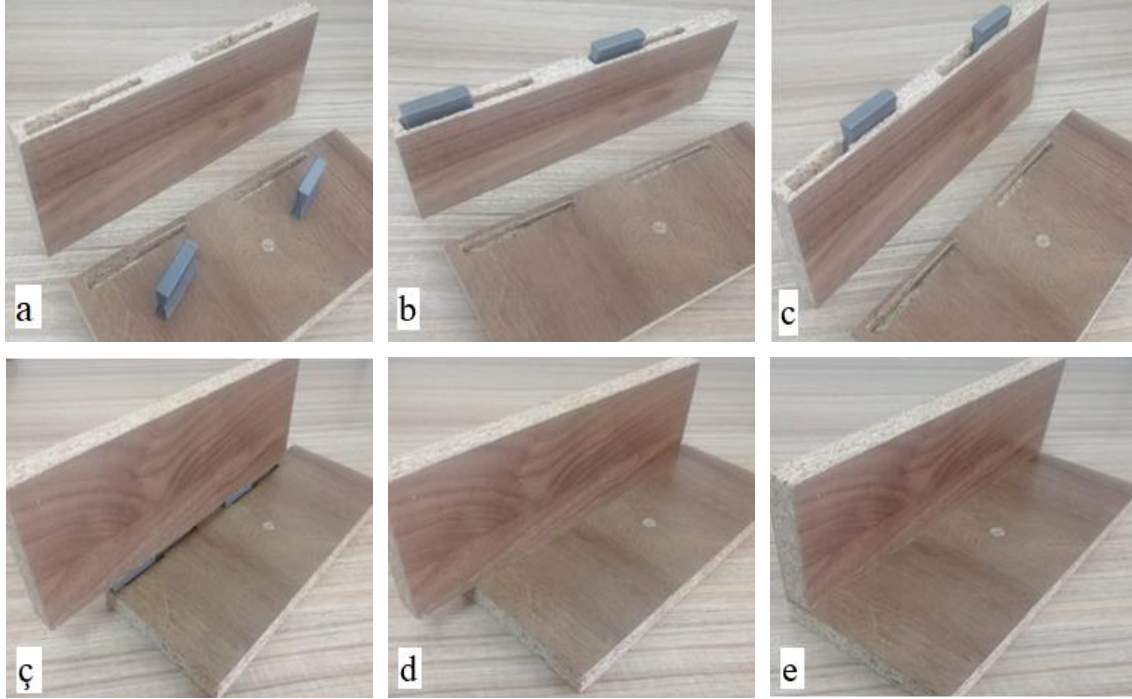
Kenar ve yüzey elemanlarına gerekli kanalların açılmasını takiben montaj aşamasına geçilmiştir. Montaj aşamasında ilk olarak bağlantı elemanları kenar elemanına açılmış olan kanallara serbest el ile kolayca yana kaydırılarak yerleştirilmiştir.

Tasarlanan bağlantı elemanı, montaj aşamalarında da görüldüğü gibi, çalışmanın amaçlarına hizmet edecek niteliktedir. Bağlantı elemanı montaj sonrasında dışardan görünmemekte, pratik bir şekilde yatay ve dikey panel elemanları hiçbir araç-gereç gerektirmeden düşük montaj kuvvetleriyle kolayca birbirlerine birleştirmektedir. Bağlantı elemanının maliyeti de firmada mevcut olarak panel mobilya birleştirmelerinde kullanılan minifiks bağlantı elemanına göre çok daha düşüktür.

Montaj sırasında ilk olarak kıvrangıç kuyruğu kesitli bağlantı elemanı, yatay elemana (kenar eleman) açılmış olan bir tarafı düz bir tarafı kıvrangıç kuyruğu şeklinde açılmış kanallardan, düz kanal olan tarafın içerisine yerleştirilmiş, daha sonra da yatay yönde kaydırılmak suretiyle kıvrangıç kuyruğu kanal tarafına yerleştirilerek sıkıştırılmıştır (Şekil 6a, 6b, 6c). Bu işlem için hiçbir araç gerece gerek duyulmamakta olup, işlem sadece el yordamıyla ve çok düşük montaj kuvvetleri uygulanmak suretiyle kolayca halledilebilmektedir.

Bu aşamadan sonra, benzer bir işlem yüzey elemanı (dikey eleman) ile kenar elemanını birleştirmek için gerçekleştirilmiştir. Burada, bağlantı elemanının kıvrangıç kuyruğu kısmının bir tarafı kenar elemanı içerisinde sıkıştırılmış durumdadır (Şekil 6c). Bu elemanda, bağlantı elemanının dışarda kalan kısmı, yüzey elemanında açılmış olan ve diğer elemanda olduğu gibi bir tarafı düz bir tarafı kıvrangıç kuyruğu şeklinde açılmış kanallardan düz olan kanalın içerisine yerleştirilmektedir (Şekil 6ç, 6d). Daha sonra da, eleman yanal yönde kaydırılmak suretiyle bağlantı elemanının kıvrangıç kuyruğu kanal içerisine yerleştirilerek sıkıştırılması sağlanmaktadır (Şekil 6e). Bu aşamada da, herhangi bir araç gereç ihtiyacı olmayıp, montaj çok düşük montaj kuvvetleriyle el yordamıyla yapılabilmektedir. Montaj sonrasında bağlantı elemanı dışardan görünmemektedir.

Deneylerde, 3 bağlantı elemanı malzemesi, 2 enine kesit yapısı (boşluklu, boşluksuz), 2 bağlantı elemanı uzunluğu, 2 yükleme biçimi ve her bir deney örneği grubundan 5 yineleme olmak üzere toplam 120 adet L-tipi köşe birleştirme deney örneği ($3 \times 2 \times 2 \times 2 = 120$) hazırlanmış ve statik diyagonal çekme ve basınç yükleri altında test edilmiştir (Şekil 7).



Şekil 6. Örneklerinin tasarlanan bağlantı elemanı ile montaj aşamaları

Çalışmaya ilişkin deneme deseni Çizelge 2’ de verilmiştir.

Çizelge 2. Çalışma kapsamına ilişkin deneme deseni

No	Malzeme	Bağlantı elemanı kesit yapısı	Bağlantı elemanı uzunluğu	Çekme Deneyi	Basınç Deneyi
1	ASA	Boşluksuz	40 mm	5	5
2			45 mm	5	5
3		Boşluklu	40 mm	5	5
4			45 mm	5	5
5	PLA	Boşluksuz	40 mm	5	5
6			45 mm	5	5
7		Boşluklu	40 mm	5	5
8			45 mm	5	5
9	PETG	Boşluksuz	40 mm	5	5
10			45 mm	5	5
11		Boşluklu	40 mm	5	5
12			45 mm	5	5
Toplam Deney Örneği				60	60
120 Adet					

Ayrıca, tasarlanan bağlantı elemanlarıyla birleştirilen örneklerden elde edilen sonuçların, minifiks bağlantı elemanı ile karşılaştırılabilmesi için, 10 adet (5 çekme, 5 basınç) minifiks bağlantılı deney örneği de hazırlanmış ve test edilmiştir. Tüm deney örnekleri, deneylere alınmadan önce $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ve $\% 65 \pm 5$ bağıl nem koşullarındaki iklimlendirme odasında denge rutubetine ulaşmaya kadar bekletilmiştir. Deney örneklerinin rutubet ve yoğunlukları için TS EN 322 ve TS EN 323’ de belirtilen esaslara uyulmuştur.

2.2 Metot

2.2.1 L-tipi köşe birleştirmelerin diyagonal basınç ve çekme deneyleri

L-tipi deney örneklerinin diyagonal çekme ve basınç yükleri altındaki moment taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için herhangi bir standart bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada L-tipi deney örnekleri üzerine geçmişte yapılan çalışmalar (Efe ve ark., 2003; Kasal ve ark., 2006; Kasal, 2008; Dalvand ve ark., 2013; Dalvand ve ark., 2014) esas alınmıştır.

Deneyler, bilgisayar kontrollü ve 5 ton kapasitesi olan Üniversal Test Cihazında, 6 mm/dak hız ile statik yüklemelerle gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, diyagonal çekme ve basınç yükleri olarak elde edilmiş ve bu yükler altında taşınan momentler (M_{ζ}) her bir örnek için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ayrıca, deney yükleri altında meydana gelen düşey yöndeki yer değiştirmeler (y) de belirlenmiş, buna göre elde edilen yük-deformasyon grafiklerinin elastik bölgesine göre birleştirmelerin elastikiyetleri (K_{ζ}) de belirlenmiştir.

Diyagonal çekme testlerinde; moment (M_{ζ}), Eşitlik 1'e, elastikiyet (K_{ζ}), Eşitlik 2'ye göre hesaplanmıştır (Şekil 7a).

$$M_{\zeta} = 0.5 F_{\max \zeta} \times 0.5 L_{\zeta} \text{ (Nm)} \quad (1)$$

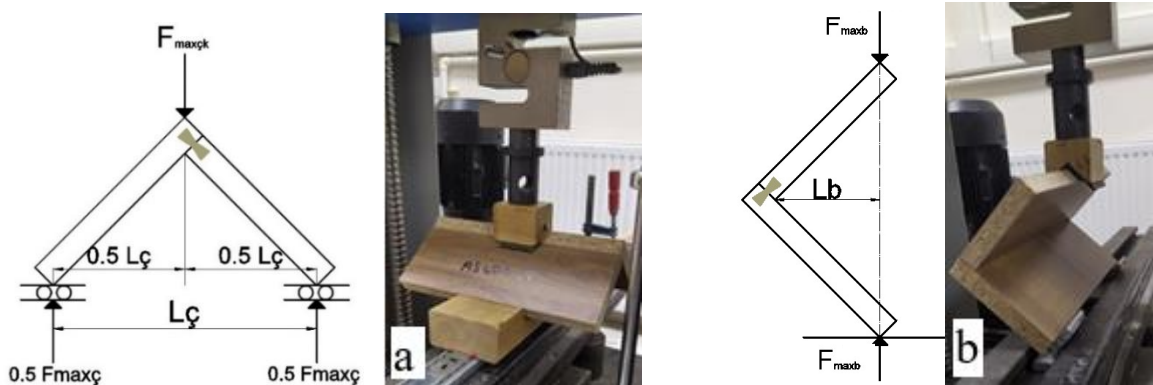
$$K_{\zeta} = \frac{F_{\max \zeta}}{y} = (N / mm) \quad (2)$$

Burada; M_{ζ} : Çekme yükü altında taşınan moment (Nm), $F_{\max \zeta}$: Göçme anındaki maksimum kuvvet (N), L_{ζ} : Moment kolu 93.34 mm ve y : yer değiştirmelerdir. Diyagonal basınç deneylerinde ise moment (M_b), Eşitlik 3'e, elastikiyet (K_b), Eşitlik 4'e göre hesaplanmıştır (Şekil 7b).

$$M_b = F_{\max b} \times L_b \text{ (Nm)} \quad (3)$$

$$K_b = \frac{F_{\max b}}{y} = (N/mm) \quad (4)$$

Burada; M_b : Basınç yükü altında taşınan moment (Nm), $F_{\max b}$: Göçme anındaki maksimum kuvvet (N), L_b : Moment kolu 93.34 mm ve y : yer değiştirmelerdir.



Şekil 7. Diyagonal çekme (a) ve basınç (b) deneyi düzeneği ve mesafeler

2.2.2 İstatistiksel değerlendirme

Deney sonuçlarının istatistiksel analizi aşamasında; istatistiksel analizler basınç deneyi sonuçları için ayrı, çekme deneyi sonuçları için ayrı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, her bir deneyden moment ve elastikiyet olmak üzere 2 farklı veri elde edilmiş olup toplamda 4 farklı bağımlı değişken kullanılmıştır. İstatistiksel analizlerde, bağlantı elemanı uzunluk ölçüsü, boşluklu olup olmaması ve bağlantı elemanı malzemesi faktörlerinin (bağımsız değişkenler), deney örneklerinin diyagonal basınç ve çekme yükleri altındaki moment taşıma kapasiteleri ve elastikiyetleri üzerindeki etkileri çoklu varyans analizi (MANOVA) ile belirlenmiştir. Varyans analizleri sonucunda farklılıkların $p < 0.05$ 'e göre istatistiksel anlamda farklı çıkması halinde, bu farklılıkların gruplar arasındaki önemini belirlemek için en küçük önemli fark (LSD) karşılaştırma testi kullanılmıştır. İstatistiksel analizlerin gerçekleştirilmesinde, "Minitab Statistical Software" programından yararlanılmıştır.

3 Bulgular ve Tartışma

3.1 Diyagonal basınç deneylerinde moment kapasitesi ve elastikiyet sonuçları

Malzeme çeşidi, kesit yapısı ve uzunluk faktörleri ile bu faktörlerin etkileşimlerinin L-tipi köşe birleştirmelerin basınç yükü altındaki moment kapasitesi ve elastikiyeti üzerindeki etkilerine ilişkin çoklu varyans analizleri Çizelge 3' te verilmiştir. Moment kapasitesi için yapılan varyans analizi sonuçlarına göre, ana faktörlerden malzeme çeşidi (M) ve kesit yapısı (K) moment kapasitesi üzerinde etkili, bağlantı elemanı uzunluğunun etkisi ise istatistiksel anlamda önemsiz çıkmıştır. İkili etkileşimlerden, M x K ve M x U anlamlı, K x U anlamsız, üçlü etkileşim M x K x U ise anlamlı bulunmuştur.

Çizelge 3. Basınç yükü altındaki moment kapasitesi ve elastikiyete ilişkin varyans analizi

Varyans Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	(P<0.05)
Moment					
Malzeme (M)	2	12.7189	6.35947	21.46	0.000*
Kesit (K)	1	2.6425	2.64250	8.92	0.004*
Uzunluk (U)	1	0.0067	0.0067	0.22	0.637
M x K	2	7.7688	3.88440	13.11	0.000*
M x U	2	10.1236	5.06182	17.08	0.000*
K x U	1	0.6000	0.60000	2.02	0.161
M x K x U	2	11.5936	5.79678	19.56	0.000*
Hata	48	14.2230	0.29631		
Toplam	59	59.7371			
Elastikiyet					
Malzeme (M)	2	33.47	16.74	3.11	0.053
Kesit (K)	1	1328.27	1328.27	247.18	0.000*
Uzunluk (U)	1	187.19	187.19	34.84	0.000*
M x K	2	9.07	4.54	0.84	0.436
M x U	2	317.82	158.91	29.57	0.000*
K x U	1	270.23	270.23	50.29	0.000*
M x K x U	2	174.99	87.50	16.28	0.000*
Hata	48	257.94	5.37		
Toplam	59	2579.00			

*: İstatistiksel olarak anlamlı

Bu sonuçlara göre, varyans analizinde anlamlı bulunan ana faktörler olan malzeme ve kesit yapısı (Çizelge 4) ile üçlü etkileşim (Çizelge 6) için karşılaştırma testleri yapılmıştır. Elastikiyet için yapılan varyans analizi sonuçlarına göre, K ve U ana faktörlerinin elastikiyet üzerindeki etkileri anlamlı, M'nin etkisi ise istatistiksel anlamda önemsiz çıkmıştır. İkili etkileşimlerden, M x K dışındaki etkileşimler ve aynı zamanda M x K x U üçlü etkileşiminin,

etkileri de anlamlı bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, varyans analizinde anlamlı bulunan ana faktörler olan kesit yapısı ve uzunluk (Çizelge 5) ile üçlü etkileşim (Çizelge 6) için karşılaştırma testleri yapılmıştır.

Moment kapasitesi ve elastikiyet değerleri için yapılan çoklu varyans analizleri sonuçlarında, ana faktörlere ilişkin F-değerleri incelendiğinde, moment kapasitesi üzerinde malzeme, elastikiyet üzerinde ise kesit yapısının belirgin etkisi göze çarpmaktadır. İkincil olarak, moment kapasitesinin kesit yapısından, elastikiyetin ise uzunluktan etkilendiği söylenebilir. Mekanik özellikleri yüksek olan malzemeler ile üretilen bağlantı elemanları doğal olarak birleştirmenin moment kapasitesini artırırken, bağlantı elemanlarının kesit yapısının boşluklu olması, deney yükleri altında malzemenin esnemesine ve dolayısıyla da birleştirmenin elastikiyetinin düşmesine yol açmıştır.

Malzeme çeşidinin ve kesit yapısının L-tipi köşe birleştirmelerin basınç yükü altındaki moment kapasitesi değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırma sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Malzeme çeşidi ve kesit yapısına göre moment ortalamalarının karşılaştırılması

Malzeme çeşidi	Moment (Nm)		Kesit yapısı	Moment (Nm)	
	(X)	HG		(X)	HG
PLA	4.82	A	Boşluksuz Boşluklu	4.66 4.24	A B
PETG	4.72	A			
ASA	3.79	B			

Buna göre, PLA ve PETG'nin moment kapasitesi aynı düzeyde olup en yüksek, ASA ise en düşük tespit edilmiştir. Kesit yapısının, L-tipi köşe birleştirmelerin basınç yükü altındaki moment kapasitesi değerlerine etkilerine göre, üretilen bağlantı elemanlarının boşluksuz olması birleştirmelerin moment kapasitesini %10 artırmıştır. Bu durum, deney yükleri altında birleştirmelerde oluşan momenti karşılamada boşluksuz olan bağlantı elemanının atalet momentinin ve malzeme miktarının fazla olması ile açıklanabilir. Ancak, moment kapasitesindeki %10'luk bir artış ile bu mukavemete ulaşmak için gerekli olan maliyetin analiz edilmesi, bir başka ifadeyle boşluksuz bağlantı elemanı kullanımının ekonomik olup olmadığını anlamak için maliyet performans analizi yapılması mantıklı bir yaklaşım olacaktır.

Kesit yapısı ve bağlantı elemanı uzunluğunun L-tipi köşe birleştirmelerin basınç yükü altındaki elastikiyet değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırma sonuçları Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Kesit yapısı ve bağlantı elemanı uzunluğuna göre elastikiyet ortalamalarının karşılaştırılması

Kesit yapısı	Elastikiyet (N/mm)		Bağlantı Elemanı Uzunluğu	Elastikiyet (N/mm)	
	(X)	HG		(X)	HG
Boşluksuz	17.46	A	45 mm	14.52	A
Boşluklu	8.05	B	40 mm	10.98	B

Kesit yapısının, L-tipi köşe birleştirmelerin basınç yükü altındaki moment kapasitesi değerlerine etkilerine göre, üretilen bağlantı elemanlarının boşluksuz olması birleştirmelerin elastikiyetini yaklaşık 2 kat artırmıştır. Üretilen bağlantı elemanlarının 45 mm uzunluğunda olması, 40 mm olmasına nazaran birleştirmelerin elastikiyetini % 32 gibi önemli bir oranda artırmıştır. Buna göre, bağlantı elemanlarının 45 mm uzunluğunda üretilmesi önerilebilir.

Malzeme çeşidi-kesit yapısı-bağlantı elemanı uzunluğu üçlü etkileşiminin, L-tipi köşe birleştirmelerin basınç yükü altındaki moment kapasitesi ve elastikiyet değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırma sonuçları Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 6. Üçlü etkileşimi için moment ve elastikiyet ortalamalarının karşılaştırılması

Malzeme Çeşidi	Kesit Yapısı	Uzunluk	Moment (Nm)		Elastikiyet (N/mm)	
			X	HG	X	HG
PLA	Boşluksuz	45 mm	4.72 (15.4)	BC	22.65 (15.8)	AB
		40 mm	4.59 (11.6)	BC	10.82 (9.8)	D
	Boşluklu	45 mm	5.62 (5.08)	A*	9.65 (11.6)	DEF
		40 mm	4.34 (12.3)	C	7.07 (20.9)	FG
PETG	Boşluksuz	45 mm	4.14 (10.5)	CD	17.35 (25.1)	C
		40 mm	5.49 (13.2)	A*	20.42 (16.9)	B
	Boşluklu	45 mm	4.21 (16.4)	C	7.20 (16.2)	EFG
		40 mm	5.05 (14.1)	AB	10.05 (13.9)	DE
ASA	Boşluksuz	45 mm	5.51 (6.6)	A*	24.05 (11.9)	A*
		40 mm	3.48 (15.9)	D	9.47 (14.8)	DEF
	Boşluklu	45 mm	2.68 (12.9)	E	6.23 (17.3)	G
		40 mm	3.52 (9.1)	D	8.10 (14.3)	DEFG

*: Parantez içerisindeki değerler varyasyon katsayılarıdır (%).

Çizelge 6’ya göre; moment kapasitesi için en yüksek değerler aynı düzeyde olup PLA-boşluklu-45 mm, PETG-boşluksuz-40 mm ve ASA-boşluksuz-45 mm kombinasyonlarında elde edilirken, en düşük moment kapasitesi değerlerini ASA-boşluklu-45 mm kombinasyonu vermiştir. PETG ve ASA malzemelerinden üretilen boşluklu bağlantı elemanlarında, uzunluğun artması moment kapasitesini düşürmüştür. En yüksek elastikiyet değerleri ASA-boşluksuz-45 mm kombinasyonunda elde edilirken, en düşük elastikiyet değerlerini ASA-boşluklu-45 mm kombinasyonu vermiştir. Buna göre, ASA malzemesinden üretilen bağlantı elemanlarının mutlaka boşluklu üretilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, ASA malzemesinden üretilen bağlantı elemanları boşluksuz olarak üretilirse en iyi moment kapasitesi ve elastikiyet değerlerini vereceği söylenebilir.

3.2 Diyagonal çekme deneylerinde moment kapasitesi ve elastikiyet sonuçları

Bağlantı elemanlarında; malzeme çeşidi, kesit yapısı ve uzunluk faktörleri ile bu faktörlerin etkileşimlerinin L-tipi köşe birleştirmelerin çekme yükü altındaki moment kapasitesi ve elastikiyeti üzerindeki etkilerine ilişkin çoklu varyans analizleri Çizelge 7’de verilmiştir.

Çoklu varyans analizi sonuçlarına göre, malzeme çeşidi (M) ve bağlantı elemanı uzunluğu (U) ana faktörlerinin moment kapasitesi üzerindeki etkileri 0,05 hata payı için anlamlı bulunurken, kesit yapısının (K) etkisi ise istatistiksel anlamda önemsizdir. M x U ve K x U ikili etkileşimleri anlamlı, M x K ikili etkileşimi ise anlamsızdır. M x K x U üçlü etkileşiminin etkileri de istatistiksel olarak anlamsızdır. Bu sonuçlara göre, varyans analizinde anlamlı bulunan ana faktörler olan malzeme ve uzunluk (Çizelge 8 ve 9) ile ikili etkileşimler (Çizelge 10 ve 11) için karşılaştırma testleri yapılmıştır. Elastikiyet için gerçekleştirilen çoklu varyans analizi sonuçlarına göre, M ve K ana faktörlerinin etkileri 0,05 hata payı için anlamlı bulunurken, U’nun etkisi ise önemsizdir. İkili etkileşimler ve üçlü etkileşimin elastikiyeti üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamlıdır. Buna göre, varyans analizinde anlamlı bulunan ana faktörler olan malzeme ve kesit yapısı (Çizelge 8 ve 9) ile üçlü etkileşim (Çizelge 12) için karşılaştırma testleri yapılmıştır.

Çizelge 7. Çekme yükü altındaki moment kapasitesi ve elastikiyete ilişkin varyans analizi

Varyans Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	(P<0.05)
Moment					
Malzeme (M)	2	197.27	98.636	11.17	0.000*
Kesit (K)	1	20.53	20.531	2.33	0.134
Uzunluk (U)	1	116.47	116.473	13.19	0.001*
M x K	2	23.47	11.735	1.33	0.274
M x U	2	543.33	271.665	30.77	0.000*
K x U	1	45.64	45.636	5.17	0.028*
M x K x U	2	18.62	9.312	1.05	0.356
Hata	48	423.80	8.829		
Toplam	59	1389.13			
Elastikiyet					
Malzeme (M)	2	576.8	288.40	8.42	0.001*
Kesit (K)	1	4210.9	4210.86	122.91	0.000*
Uzunluk (U)	1	34.4	34.36	1.00	0.322
M x K	2	458.6	229.29	6.69	0.003*
M x U	2	3987.1	1993.57	58.19	0.000*
K x U	1	1937.8	1937.85	56.56	0.000*
M x K x U	2	1087.5	543.77	15.87	0.000*
Hata	48	1644.5	34.26		
Toplam	59	13937.6			

*: İstatistiksel olarak anlamlı

Malzeme çeşidinin, çekme yükü altındaki moment kapasitesi ve elastikiyet değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırılma sonuçları Çizelge 8’de verilmiştir.

Çizelge 8. Malzeme çeşidine göre moment ve elastikiyet ortalamalarının karşılaştırılması

Malzeme çeşidi	Moment (Nm)		Elastikiyet (N/mm)	
	(X)	HG	(X)	HG
ASA	32.76	A	66.22	A
PETG	30.34	B	59.81	B
PLA	28.33	C	59.48	B

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda; hem moment hem de elastikiyet için malzemeler arasındaki başarı sıralaması ASA, PETG ve PLA şeklindedir. PETG ve PLA’ dan üretilen bağlantı elemanlarıyla birleştirilmiş örneklerin elastikiyetleri arasındaki farklar anlamsızdır.

Bağlantı elemanı uzunluğunun, çekme yükü altındaki moment kapasitesine ve kesit yapısı faktörünün de elastikiyet değerleri üzerindeki etkilerine ait ortalamaların karşılaştırılma sonuçları Çizelge 9’da verilmiştir.

Çizelge 9. Bağlantı elemanı uzunluğu ve kesit yapısına göre moment ve elastikiyet ortalamalarının karşılaştırılması

Bağlantı Elemanı Uzunluğu	Moment (Nm)		Kesit yapısı	Elastikiyet (N/mm)	
	(X)	HG		(X)	HG
45 mm	31.87	A	Boşluksuz	70.22	A
40 mm	29.08	B	Boşluklu	53.46	B

Bağlantı elemanı uzunluğunun, L-tipi köşe birleştirmelerin çekme yükü altındaki moment kapasitesi değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırma sonuçlarına göre, bağlantı elemanı uzunluğunun birleştirmelerin moment kapasitesi üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Bağlantı elemanının 40 mm den 45 mm’ ye çıkarılması, birleştirmelerin çekme yükü altındaki moment taşıma kapasitesini %10 artırmıştır. Uygun derinliğe sahip kutu

tipi mobilyalarda, bağlantı elemanı uzunluğunun artırılmasının mukavemeti daha da artıracakı düşünülmektedir. Kesit yapısının, L-tipi köşe birleştirmelerin çekme yükü altındaki elastikiyet değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırma sonuçlarına göre, bağlantı elemanlarının boşluksuz olarak üretilmesi birleştirmelerin elastikiyetini önemli derecede artırmıştır. Boşluksuz bağlantı elemanlı birleştirmeler, boşluklu bağlantı elemanlı birleştirmelere göre çekme yükü altında %32 daha yüksek elastikiyete sahip bulunmuşlardır.

Malzeme çeşidi-bağlantı elemanı uzunluğu ikili etkileşiminin, L-tipi köşe birleştirmelerin çekme yükü altındaki moment kapasitesi değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırma sonuçları Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. Malzeme çeşidi-bağlantı elemanı uzunluğu ikili etkileşim moment ortalamaları

Malzeme	Uzunluk	Moment (Nm)	
		(X)	HG
ASA	45 mm	38.42	A
	40 mm	27.12	C
PETG	45 mm	29.71	BC
	40 mm	30.98	B
PLA	45 mm	27.50	C
	40 mm	29.16	BC

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, en yüksek moment kapasitesi değerleri 45 mm uzunluğunda ASA malzemeden üretilmiş bağlantı elemanlarıyla elde edilirken, en düşük moment kapasitesi değerlerini yine ASA malzemeden üretilen 40 mm uzunluğundaki bağlantı elemanı ile üretilmiş birleştirmeler vermiştir. ASA' dan üretilmiş 40 mm uzunluğundaki bağlantı elemanlı birleştirmeler ile PLA' dan üretilmiş bağlantı elemanlı birleştirmeler arasındaki mukavemet farkları istatistiksel olarak önemsizdir.

Kesit-uzunluk ikili etkileşiminin, birleştirmelerin çekme yükü altındaki moment kapasitesi değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırma sonuçları Çizelge 11'de verilmiştir.

Çizelge 11. Kesit yapısı-bağlantı elemanı uzunluğu ikili etkileşim moment ortalamaları

Kesit yapısı	Uzunluk	Moment (Nm)	
		(X)	HG
Boşluksuz	45 mm	31.59	A
	40 mm	30.55	A
Boşluklu	45 mm	32.16	A
	40 mm	27.63	B

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, en düşük moment kapasitesi değerleri 40 mm uzunluğunda ve boşluklu olarak üretilmiş bağlantı elemanlı birleştirmelerde elde edilmiş olup diğer kombinasyonlardaki bağlantı elemanlı birleştirmelerin mukavemetleri arasındaki farklar bilimsel olarak anlamsız çıkmıştır. Malzeme çeşidi-kesit yapısı-bağlantı elemanı uzunluğu üçlü etkileşiminin, L-tipi köşe birleştirmelerin çekme yükü altındaki elastikiyet değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırma sonuçları ve deneylerden elde edilen moment kapasitesi değerleri Çizelge 12'da verilmiştir. Malzeme-kesit yapısı-bağlantı elemanı uzunluğu üçlü etkileşiminin, birleştirmelerin moment kapasitesi üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur. Bu nedenle üçlü karşılaştırma sonuçlarında moment kapasitesi değerleri homojenlik grupların ayrılmamıştır. Birleştirmelerin elastikiyet değerleri için, en yüksek değerlerin elde edildiği kombinasyon PETG-boşluksuz-40 mm olup, en düşük elastikiyet değerleri ASA-boşluklu-40 mm kombinasyonunda elde edilmiştir.

Çizelge 12. Üçlü etkileşimi için elastikiyet ortalamalarının karşılaştırılması ve momentler

Malzeme Çeşidi	Kesit Yapısı	Uzunluk	Moment (N)	Elastikiyet (N/mm)	
				X	HG
PLA	Boşluksuz	45 mm	28.72 (9.1)	63.33 (10.1)	D
		40 mm	30.63 (5.9)	65.62 (2.8)	CD
	Boşluklu	45 mm	26.29 (9.1)	54.41 (8.5)	E
		40 mm	27.70 (8.9)	54.58 (14.9)	E
PETG	Boşluksuz	45 mm	28.84 (10.6)	49.81 (10.2)	EF
		40 mm	33.06 (9.5)	93.35 (5.9)	A
	Boşluklu	45 mm	30.57 (10.7)	48.20 (8.4)	EF
		40 mm	28.91 (13.9)	47.91 (8.7)	EF
ASA	Boşluksuz	45 mm	37.20 (6.6)	78.19 (9.8)	B
		40 mm	27.95 (12.4)	71.00 (9.5)	BC
	Boşluklu	45 mm	39.63 (7.2)	72.56 (9.1)	BC
		40 mm	26.29 (11.6)	43.13 (14.1)	F

*: Parantez içerisindeki değerler varyasyon katsayılarıdır (%)

4 Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, panel mobilya köşe birleştirmelerinde kullanılan minifiks bağlantı elemanına alternatif olarak, yeni inovatif bir bağlantı elemanı tasarımı yapılmış ve bağlantı elemanının tasarımında çeşitli faktörler incelenerek en yüksek mukavemete sahip bağlantı elemanı araştırılmıştır. Bu kapsamda:

- Minifiks için de aynı testler karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.
- Karşılaştırma sonuçlarında, basınç ve çekme altındaki moment kapasitelerine bakıldığında, tasarlanan bağlantı elemanları ile birleştirilen deney örneklerinin, minifiks ile birleştirilmiş deney örneklerine nazaran daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir.
- Basınç deneylerinde, tasarlanan en iyi bağlantı elemanlı birleştirmelerin (PLA-Boşluklu-45 mm), minifiksli birleştirmelerin yaklaşık %67'si kadar moment taşıdığı; çekme deneylerinde ise %80'i kadar moment taşıdığı belirlenmiştir.
- Sonuçta, moment taşıma kapasitesi olarak yeni tasarlanan bağlantı elemanlarıyla, minifiksli birleştirmelerin ortalama %73'ü mukavemete ulaşılmıştır.
- Karşılaştırma sonuçlarında, basınç ve çekme yükü altındaki elastikiyet değerlerine bakıldığında, tasarlanan bağlantı elemanı ile birleştirilen deney örneklerinin, minifiks ile birleştirilmiş deney örneklerine nazaran daha düşük sonuçlar verdiği görülmektedir.
- Basınç deneylerinde; elastikiyet açısından, tasarlanan en iyi bağlantı elemanlı birleştirmelerle (PETG-Boşluksuz-45 mm) minifiksli birleştirmelerin yaklaşık %83'üne ulaşıldığı; çekme deneylerinde ise %61'i kadar elastikiyet sonuçları alındığı görülmüştür.
- Elastikiyet bakımından, yeni tasarlanan bağlantı elemanlarıyla, minifiksli birleştirmelerin ortalama %72'sine ulaşılmıştır.
- Yeni tasarlanan bağlantı elemanlarıyla, minifiksli birleştirmelerin hem moment kapasitesi hem de elastikiyet açısından yaklaşık %72'sine ulaşılmıştır.
- Bu bağlamda, bağlantı elemanı tasarımlarının, yeni malzemeler ve yeni üretim teknolojileri ile çalışılıp geliştirilerek bu oranın artırılabilmesi hatta minifiksten daha güçlü birleştirmeler tasarlanabileceği öngörülmektedir.

Teşekkür

Bu makale, ikinci yazarın TÜBİTAK 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında 1139B412100417 başvuru numarası ile desteklenen ve Danışmanlığı birinci yazar tarafından yürütülen proje çalışmasından üretilmiştir. Proje süreci, BELLONA Mobilya Sanayi ve Ticaret A.Ş. ile ortak yürütülmüştür.

Yazar Katkıları

Ali Kasal: Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), Metodolojinin belirlenmesi, Araştırmanın yapılması, Analizlerin yapılması, Veri iyileştirme, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma, inceleme ve düzenleme. **Sadullah Sayarcan:** Araştırmanın yapılması, Analizlerin yapılması, Veri iyileştirme, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma. **Tolga Kuşkun:** Metodolojinin belirlenmesi, Araştırmanın yapılması, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, inceleme ve düzenleme.

Finansal destek beyanı

Makale çalışmasının üretildiği projenin yürütülmesinde Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'dan 22029-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında destek alınmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- ASTM D3039/D3039M-17, (2017). Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- Ceylan, E., Kasal, A., Smardzewski, J., Yüksel, M., ve Kuşkun, T., (2024). Çerçeve konstrüksiyonlu mobilya birleştirmeleri için tasarlanan auksetik kavelaların sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ve kavak (*Populus nigra* L.) kontrplak ile tutma mukavemeti, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 7(2), 188-203, DOI: [10.33725/mamad.1527043](https://doi.org/10.33725/mamad.1527043)
- Dalvand, M., Ebrahimi, G., Haftkhani, A. R., and Maleki, S., (2013). Analysis of factors affecting diagonal tension and compression capacity of corner joints in furniture frames fabricated with dovetail key, *Journal of Forestry Research*, 24(1), 155-168, DOI: [10.1007/s11676-013-0336-y](https://doi.org/10.1007/s11676-013-0336-y)
- Dalvand, M., Ebrahimi, G., Tajvidi, M., and Layeghi, M., (2014). Bending moment resistance of dowel corner joints in case-type furniture under diagonal compression load, *Journal of forestry research*, 25(4), 981-984, DOI: [10.1007/s11676-014-0481-y](https://doi.org/10.1007/s11676-014-0481-y)
- Eckelman, C.A. and Rabiej, R. (1985). A comprehensive method of analysis of case furniture, *Forest Product Journal*, 35, 62-68.
- Eckelman, C.A., (2003). *Textbook of product engineering and strength design of furniture*, Text Book, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 54-59.
- Efe, H., 1994. *Modern mobilya çerçeve konstrüksiyon tasarımında geleneksel ve alternatif bağlantı tekniklerinin mekanik davranış özellikleri*, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, 3-8.
- Efe, H., Kasal, A., ve Diler, H., (2003). Kutu konstrüksiyonlu vidalı mobilya köşe birleştirmelerde eğilme moment dirençleri, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 97-110.

- Jivkov, V., Marinova, A., Paper, C., Jivkov, V., and Marinova, A. (2005). Investigation on ultimate bending strength and stiffness under compression of corner joints from particleboard. In Proceedings of the International Scientific Conference Interior and Furniture Design 10th Anniversary Celebration of Engineering Design, 10 October 2005, pp. 155–163, Sofia, Bulgaria.
- Kasal, A., (2004). *Masif ve kompozit ağaç malzemelerden üretilmiş çerçeve konstrüksiyonlu koltukların performansı*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara,
- Kasal, A., Şener, S., Belgin, M. Ç., ve Efe, H., (2006). Bending strength of screwed corner joints with different materials, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19 (3), 155-161.
- Kasal, A., (2008). Effect of the number of the screws and screw size on moment capacity of furniture corner joints in case construction, *Forest Product Journal*, 58(6), 36-44.
- Krzyżaniak, Ł., and Smardzewski, J., (2021). Impact damage response of L-type corner joints connected with new innovative furniture fasteners in wood-based composites panels, *Composite Structures*, 255, 113008, DOI: [10.1016/j.compstruct.2020.113008](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113008)
- Maleki, S., Derikvand, M., Dalvand, M., and Ebrahimi, G. (2012a). Load-carrying capacity of mitered furniture corner joints with dovetail keys under diagonal tension load, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36(5), 636-643, DOI: [10.3906/tar-1112-44](https://doi.org/10.3906/tar-1112-44)
- Maleki, S., Haftkhani, A. R., Dalvand, M., Faezipour, M., and Tajvidi, M., (2012b). Bending moment resistance of corner joints constructed with spline under diagonal tension and compression, *Journal of Forestry Research*, 23(3), 481-490, DOI: [10.1007/s11676-012-0288-7](https://doi.org/10.1007/s11676-012-0288-7)
- Örs, Y., ve Efe, H., (1998). The mechanical behavior properties of fasteners in furniture design for frame construction, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, (22), 21-28.
- Podskarbi, M., Smardzewski, J., Moliński, K., and Molińska-Glura, M., (2017). Design methodology of new furniture joints, *Drvna Industrija*, 67(4), 371-380. DOI: [10.5552/drind.2016.1622](https://doi.org/10.5552/drind.2016.1622)
- Podskarbi, M., and Smardzewski, J., (2019). Numerical modelling of new demountable fasteners for frame furniture, *Engineering Structures*, 185, 221-229. DOI: [10.1016/j.engstruct.2019.01.135](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.135)
- Tankut, N. (2009). Effect of various factors on the rigidity of furniture cases. *African Journal of Biotechnology*, 8, 5265–5270.
- TS EN 322, (1999). Wood-based panels- Determination of moisture content. TSE. Ankara, Türkiye.
- TS EN 323, (1999). Wood- Based panels- Determination of density. TSE. Ankara, Türkiye.



3B yazıcıda farklı baskı yönlerinde üretilen PLA ve PLA-Wood cıvataların mekanik özelliklerinin incelenmesi

Abdulsamed Arık¹, Nergizhan Anaç^{1*}, Vahap Neccaroğlu², Oğuz Koçar¹,
Ali Ulaş Gümüşlüoğlu¹, Hikmet Sefa Dönmez¹

ÖZ: Bu çalışmada, ticari Poliamid 6.6 (PA 6.6) cıvata ile eriyik yığma modelleme (EYM) yöntemiyle üretilen saf (katkısız) PLA (polilaktik asit) ve PLA-Wood (odun unu katkılı PLA) cıvataların tork dayanımları ve kırılma yüzeyleri incelenmiştir. 3B yazıcıda farklı baskı yönlerinde (0°, 45°, 90°) M8x1.25x70 boyutlarında cıvatalar üretilmiştir. Malzemelerin çekme, eğme, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü özellikleri karşılaştırılmıştır. Çekme testinde, saf PLA malzemesi PLA-Wood'a göre yaklaşık %45; eğilme testinde ise %52 daha yüksek dayanım göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğü açısından PLA-Wood, saf PLA'ya göre %29 daha pürüzlü yüzey sunmuştur. Tork testlerinde saf PLA, PLA-Wood'a kıyasla %79 daha yüksek tork dayanımı sergilemiştir. Ticari PA 6.6 cıvata ise yalnızca saf PLA'nın 0° yönelimli numunesinden daha düşük performans göstermiştir. Bu bulgular, baskı yöneliminin ve malzeme seçiminin 3B yazdırılmış bağlantı elemanlarının performansı üzerinde belirleyici olduğunu ve 0° yönelimin genel olarak en avantajlı sonuçları sağladığını ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler, hafif yapısal uygulamalarda ve montaj-tamirat işlerinde referans niteliğindedir.

Anahtar kelimeler: Eriyik yığma modelleme, PLA-Wood, Yazdırma yönü, Cıvata

Investigation of the mechanical properties of PLA and PLA-wood bolts fabricated via 3D printing with different print orientations

ABSTRACT: This study investigates the torque resistance and fracture surfaces of pure PLA (polylactic acid) and PLA-Wood (wood flour added polylactic acid) bolts manufactured via Fused Deposition Modeling (FDM), compared to commercial Polyamide 6.6 (PA 6.6) bolts. M8×1.25×70 bolts were 3D-printed at varying orientations (0°, 45°, 90°) to evaluate the effects of printing direction on mechanical properties. The hardness, surface roughness, tensile strength, and flexural strength of pure PLA and PLA-Wood were analyzed. Results indicate that 0° print orientation yielded the highest mechanical strength, while significant degradation occurred at 45° and 90°. Surface roughness was minimized at 0° and peaked at 45°. PLA-Wood demonstrated inferior performance to pure PLA, and the torque resistance of PA 6.6 bolts was substantially lower than that of 0°-oriented pure PLA bolts. These findings provide critical insights for material selection and design in lightweight structural applications, assembly, and repair processes.

Keywords: Fused Deposition Modeling, PLA-Wood, Print Orientation, Bolt

1 Giriş

Katmanlı imalat (Kİ) teknolojisi; temeli dijital modellere dayanan, malzemenin katmanlar hâlinde birleştirilmesiyle üç boyutlu nesnelerin üretilmesini sağlayan yenilikçi bir üretim yöntemidir. Geleneksel imalat süreçlerine kıyasla tasarım esnekliği, özelleştirme imkânı ve hammadde verimliliği gibi avantajları sayesinde, havacılık, otomotiv, tıp ve hediyelik eşya gibi çeşitli sektörlerde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Jadhav ve Jadhav, 2022; Bharat ve ark., 2024). Kİ'in yaygın alt teknolojilerinden biri olan Eriyik Yığma Modelleme (EYM), düşük maliyeti, sade işlem parametreleri ve geniş malzeme seçenekleriyle öne çıkmaktadır (Ulkir and Akgun, 2024). EYM yönteminde yaygın olarak kullanılan polilaktik asit (PLA), yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ve biyobozunur özelliğiyle çevre dostu bir termoplastiktir. PLA malzemeye çeşitli katkı maddeleri eklenmesiyle farklı termal, kimyasal, mekanik ve yüzey özelliklere sahip parçalar üretilebilmektedir (Er and Aydın, 2023). Çevre dostu malzeme arayışı, plastik malzemelerin yerine geçebilecek doğal lif takviyeli kompozitlere ilgiyi artırmıştır. PLA esaslı biyokompozitler, odun lifleri gibi doğal takviyelerle güçlendirildiğinde hem mekanik performans artışı sağlar hem de sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sunar (Durmaz, 2022; Kechagias ve ark., 2022). Bu tür kompozitlerin kullanımı, estetik açıdan doğal görünümlü ürünlerin üretimine olanak tanırken, çevresel etkileri azaltmak için çözüm sunmaktadır (Zuo ve ark., 2024; Yang ve ark., 2025).

Literatürde, biyokompozit malzemelerin üretiminde kullanılan 3B (Üç Boyut) baskı parametrelerinin (örneğin katman kalınlığı, baskı sıcaklığı ve doluluk oranı) nihai ürün üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde incelenmiştir (Fountas ve ark., 2023; Chen, ve ark., 2025). Zandi ve arkadaşları, PLA/ahşap kompozitlerde katman kalınlığı, nozul çapı ve doluluk oranının eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini Taguchi deney tasarımı ile inceleyerek, %75 doluluk oranı ve 0.2 mm katman kalınlığının en yüksek mekanik performansı sağladığını belirtmişlerdir (Zandi ve ark., 2020). Kechagias ve arkadaşları ise hindistan cevizi lif katkılı PLA kompozitlerde, 200 °C nozul sıcaklığının en yüksek çekme dayanımını sağladığını raporlamıştır (Kechagias ve ark., 2022). Öte yandan, baskı sırasında malzemenin yerleştirilme yönü, mekanik özellikler ve yüzey kalitesi üzerinde doğrudan etkili olan bir parametredir. Baskı yönü, baskının tabla düzleminde hangi yönde yerleştirildiğini ifade eder ve farklı açılar (örneğin 0°, 45° ve 90°) baskı yönüne paralel ya da çapraz malzeme yerleşimiyle parça dayanımında farklılıklar yaratabilir. Górski ve ark., (2013), yönelim açısının yazdırma işleminin yeniden üretilebilirliğini doğrudan etkilediğini bildirmiştir. Doğru ve ark., (2024), katmanlı imalatla PLA ve PET (Polietilen Tereftalat) polimerlerinden üretilen cıvata ve somunların tork dayanımlarını ve sertliklerini incelemişlerdir. Katmanlı üretim yöntemleriyle üretilen bağlantı elemanlarının, düşük veya orta yüklere dayanmak için büyük veya alışılmadık şekilli bağlantı elemanlarının gerekli olduğu durumlarda avantajlı olduğunu ifade etmişlerdir. Drazan ve ark., (2025), 0°, 45° ve 90° açıyla 3B yazdırılmış Akrilonitril Stiren Akrilat (ASA) malzeme ile M10 somun üretimi ve çekme testleri yapmışlardır. 3B yazdırılmış somunların en yüksek çekme mukavemeti, numuneler 45°'de yönlendirildiğinde olmuştur. Harshitha ve Rao (2019), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve PLA malzemenin M12 cıvatalarının 3B baskısı alınmıştır. Solidworks ve ANSYS yazılımları kullanılarak cıvata ve somunun bağlantı tasarımı ve analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları, PLA'dan yapılan cıvatanın deformasyon olarak ABS'den yapılmış cıvatalara göre kesmede daha güçlü olduğunu göstermiştir.

Doğal malzeme takviyeli PLA esaslı filamentlere yönelik çalışmalarda, takviyelerin mekanik açıdan sağladıkları etkilere de odaklanılmıştır. Dembri ve ark., (2024), PLA/biochar/Washingtonia robusta lif kompozitlerinde %3 NaOH ile işlem görmüş liflerin

çekme ve eğilme dayanımını önemli ölçüde artırdığını; bu iyileşmenin, lif-matris ara yüzey bağlanmasındaki iyileşmeden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Lekrine ve arkadaşları da, NaHCO₃ ile 72 saat muamele edilen liflerin 37.41 MPa çekme dayanımı ile en iyi sonucu verdiğini; ancak daha uzun sürelerde liflerin yapısal olarak bozulduğunu tespit etmişlerdir (Lekrine ve ark., 2024). Benzer şekilde, Narhoğlu ve ark., (2021) %20 oranında çam talaşı içeren PLA kompozitlerde çekme dayanımının yaklaşık 8 MPa'ya düştüğünü, bunun sebebinin lif-matris arayüzeyinin zayıf bağlanması olduğunu belirtmişlerdir. Stoof ve ark., (2017) ise yüksek ahşap katkı oranlarında ($\geq$ %15) çekme dayanımında belirgin bir düşüş gözlemlemişlerdir. PLA/ahşap kompozitler, düşük yoğunluk, karbon ayak izinin azalması, biyobozunurluk ve düşük nem emilimi gibi nitelikleri sayesinde yalnızca teknik performans açısından değil, çevreyi korumak içinde dikkat çekicidir. Bu özellikleriyle yapı malzemeleri, otomotiv parçaları, mobilya ürünleri, dekoratif ürünler ve biyomedikal modeller gibi çeşitli alanlarda kullanım potansiyeline sahiptirler (Zolfaghari ve ark., 2013; Pozo Morales ve ark., 2017).

Efe ve İmirzi (2007), mobilya endüstrisinde kullanılan masif ve kompozit ağaç malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri ile T-tipi birleştirmelerin performans özelliklerini incelemişlerdir. Birleştirme çeşidine göre karşılaştırıldığında kuvvet taşıma performansına göre en yüksek direnci kavelalı birleştirmelerin verdiğini bildirmişlerdir. Bunu sırası ile alyan vidalı birleştirme ve yıldız vidalı birleştirme çeşitleri takip etmiştir. 3B yazıcıda üretilmiş odun plastik kompozitlerin mobilya bağlantı elemanlarının birleştirilmesi için kullanılabilirliği konusunda çalışmalar sınırlıdır (Jasiński ve ark., 2025). Oysaki, plastik malzemelerden üretilen bağlantı elemanları sektörde yoğun olarak bulunmaktadır. Bu bağlamda, saf PLA ve PLA esaslı ahşap kompozitlerin üretim süreçlerinin ve performans özelliklerinin sistematik biçimde araştırılması, mobilya endüstrisinde 3B yazıcı kullanımına yönelik önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu çalışmanın amacı, sökülebilir mobilya bağlantılarında 3B yazıcılarda üretilen mekanik parçaların kullanılabilirliğini araştırmak ve sürdürülebilir üretim yaklaşımlarına yönelik deneysel veri sağlamaktır.

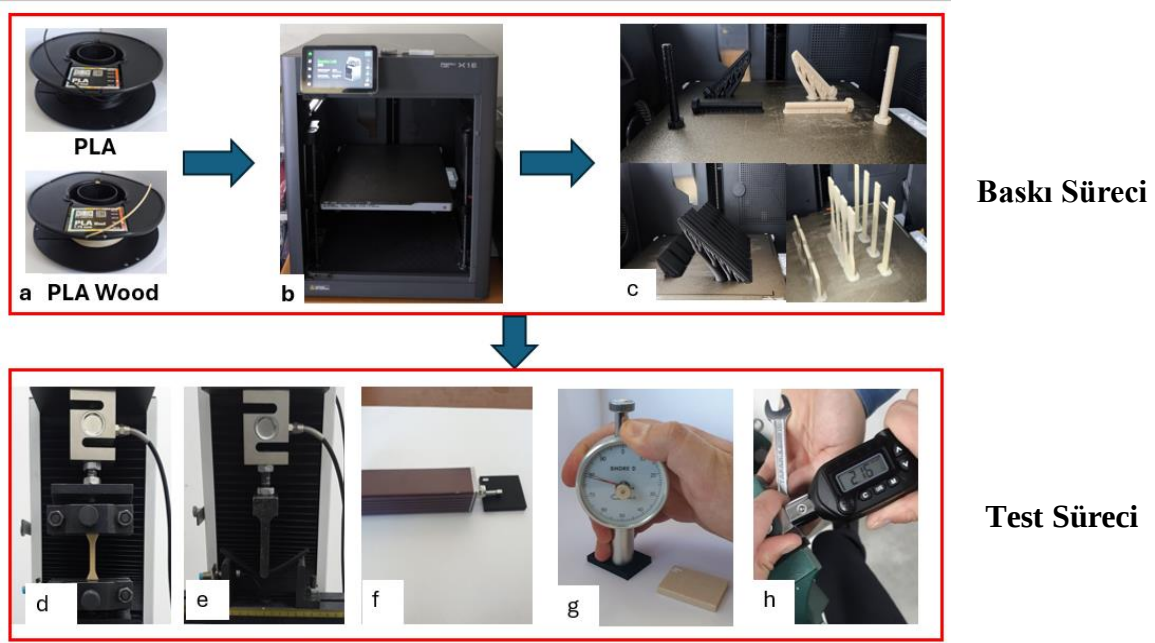
2 Materyal ve Metot

Yapılan çalışmada Bambu Lab X1E model yüksek hassasiyetli 3B yazıcı ve Filameon markasına ait saf PLA ve PLA-Wood filamentleri kullanılmıştır. Deney numuneleri, 0°, 45° ve 90° olmak üzere farklı yönlerde basılmıştır. 3B numunelerin çekme, eğme mukavemetleri, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca PSA Teknik Group'tan temin edilen poliamid 6.6 (PA6.6) malzemeden üretilen, DIN933 standardında M8x1,25x70 altı köşe tam dış cıvatalar ile birlikte saf PLA ve PLA-Wood'tan üretilen aynı boyuttaki cıvatalara tork testleri uygulanmıştır. Bütün sonuçlar karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Şekil 1'de numunelerin üretim aşaması ve mekanik testlerini içeren iş akış şeması verilmiştir.

2.1 Malzeme özellikleri

Yapılan çalışmada Filameon markasına ait 1.75 mm çapında siyah saf PLA ve açık kahverengi PLA-Wood filamentleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında saf PLA ve PLA-Wood filamentlerden üretilen cıvatalar 3B yazıcıda basılmıştır. PA6.6 cıvatalar, PSA Teknik Group'tan satın alınmıştır. Deneylerde kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Saf PLA yapısı itibarıyla insan sağlığına zarar vermeyen, toksik etkisi bulunmayan ve karbon ayak izini azaltan çevreci bir malzemedir. PLA-Wood ise, odun parçalarının küçük odununu haline getirilerek saf PLA içerisine %30 oranında ilave edilmesiyle elde edilmiştir (Ayrılmis ve ark., 2019). PLA-Wood filament, odununu katkı

polimer kompozittir. Odun polimer kompozitler, esas olarak polimer matrisler ve selüloz esaslı dolgu maddeleri kullanılarak oluşturulur. Mobilya sektöründe plastik malzemelerin yerine alternatif olarak kullanılan malzeme çeşitlerinden biridir (Avcı ve ark., 2022; Jasiński ve ark., 2025). Poliamid 6.6, poliamid plastikler içinde en dayanıklı ve en yüksek erime noktasına sahip malzeme olarak tanınır (Pozo Morales ve ark., 2017). Mukavemet, sertlik ve rijitliği yüksek ve ani darbelere karşı çalışmaya uygun malzemelerdir.



Şekil 1. Deney iş akışı (a) Filamentler, (b) 3B yazıcı, (c) Üretilen numuneler, (d) Çekme testi, (e) Eğme testi, (f) Yüzey pürüzlülük testi, (g) Sertlik testi, (h) Dijital tork anahtarı

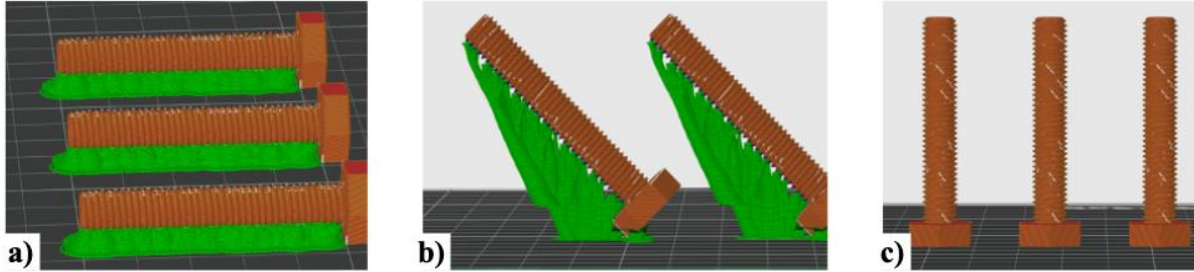
Çizelge 1. Malzemelerin Mekanik Özellikleri (Pozo Morales ve ark., 2017; URL-1, 2025; URL-2, 2025)

Mekanik Özellikler	Saf PLA	PLA-Wood	PA 6.6
Yoğunluk (g/cm ³)	1.24	1.13	1.15
Çekme Dayanımı (MPa)	50	47	85
Çekme Uzaması (%)	20	-	7

2.2 3B baskı süreci

Saf PLA'nın 3B yazdırma işlemi 270 mm/s baskı hızı, 207°C nozul sıcaklığı ve 60°C tabla sıcaklığında; PLA-Wood'un ise 270 mm/s baskı hızı, 215°C nozul sıcaklığı ve 60°C tabla sıcaklık parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazdırma işlemlerinde 0.4 mm çapında nozul kullanılmıştır. Katman yüksekliği her iki malzeme için 0.2 mm olarak belirlenmiştir. Yazdırma sırasında kullanılan hat genişliği 0,8 mm, dış duvar hat sayısı 2 ve üst-alt katman sayısı 5 olarak ayarlanmıştır. Doluluk oranı %100 olacak şekilde ayarlanmış ve dolgu deseni olarak çizgi tipi desen tercih edilmiştir. Numune yönelimleri, literatürde yaygın olarak kullanılması nedeniyle 0°, 45° ve 90° (Şekil 2) olarak belirlenmiştir (Górski ve ark.,

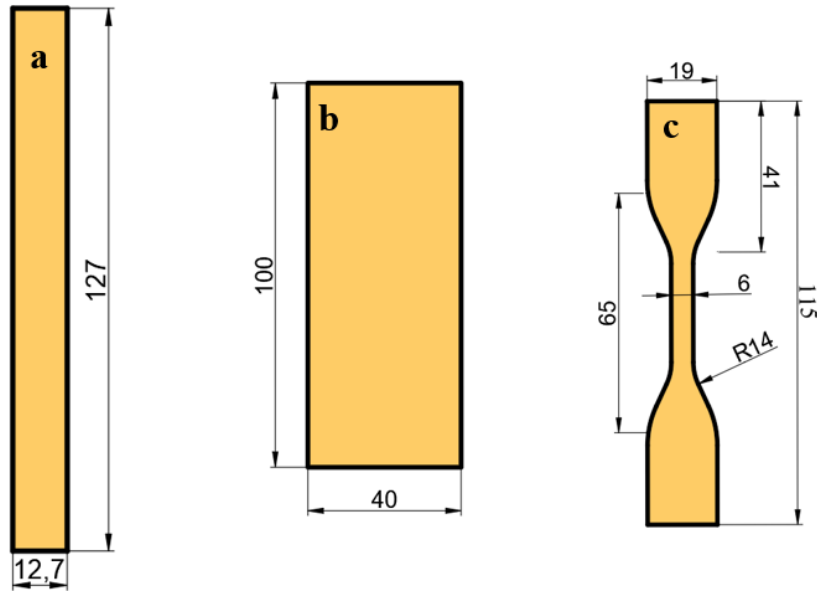
2013; Singh, 2013). Numuneler, Bambu Lab X1E yazıcıda %100 doluluk oranında ve 0.2 mm katman kalınlığında üretilmiştir. Şekil 2’de cıvataların basım yönleri gösterilmiştir. Saf PLA ve PLA-Wood malzemelerden M8 standardına uygun, dış üstü çapı 8 mm ve adımı 1.25 mm olan cıvatalar 3B yazıcıda basılmıştır.



Şekil 2. Saf PLA ve PLA-Wood cıvataların basım yönelimleri a) 0° b) 45° c) 90°

2.3 Malzeme özelliklerini belirlemek için kullanılan testler

Yapılan çalışmada saf PLA ve PLA-Wood filamentleri ile üretilen numunelere, ASTM D638 (ASTM D638, 2022) standardına göre çekme ve ASTM D790 (ASTM D790, 2017) standardına göre eğme testleri uygulanmıştır. Çekme testleri 1 mm/dk ve eğme testleri 5 mm/dk test hızında (oda sıcaklığında) gerçekleştirilmiş ve testler için 5 kN kapasiteye sahip WDW-5 model universal test cihazı kullanılmıştır. Numuneler her bir test için dört defa testlere tabi tutulmuşlardır. Sertlik değerleri ASTM D2240 standardına (ASTM D2240, 2021) uygun olacak şekilde Loyka (Shenzhen, Çin) markalı Shore-D durametreli cihaz ile 4 farklı noktadan ölçülmüştür. Şekil 3’te testlerde kullanılan numunelerin boyutları gösterilmiştir.



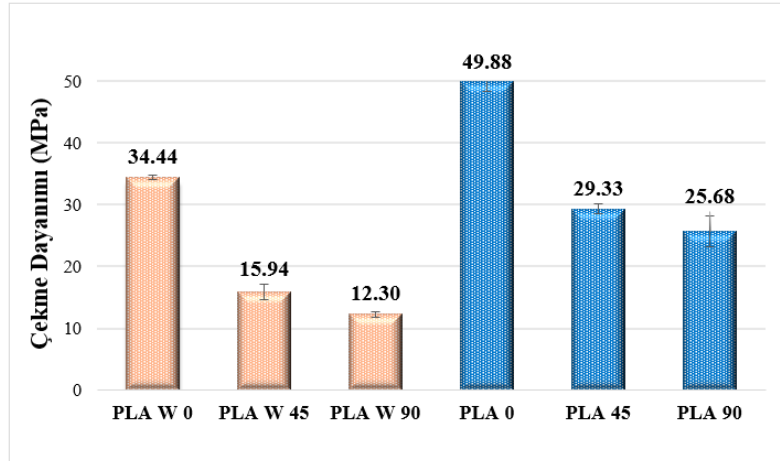
Şekil 3. Test numunelerinin boyutları: a) eğme, b) sertlik ve yüzey pürüzlülüğü, c) çekme (ölçüler mm’dir).

Yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo (Kawasaki, Japonya) marka SJ301 model portatif yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazıyla numunelerin üst yüzeyinde 5 tekrarla ölçülmüş ve değerlerin ortalamaları alınmıştır. Ölçümlerde, örnekleme uzunluğu (cut-off) 0.8 mm, değerlendirme uzunluğu 4 mm olarak seçilmiştir.

3 Bulgular ve Tartışma

3.1 Çekme testi sonuçları

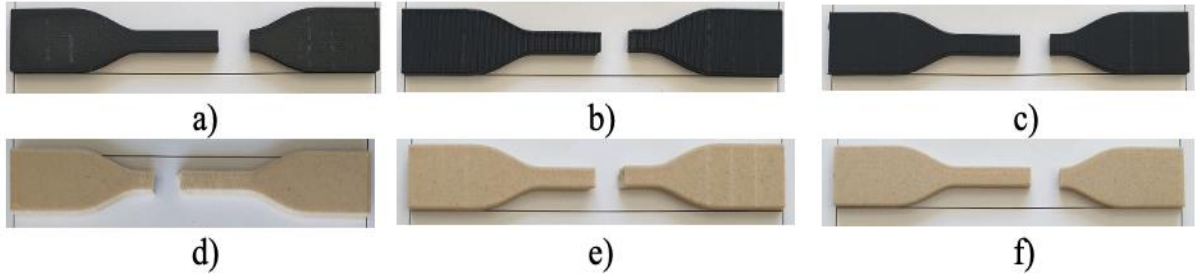
Çekme testi sonuçlarına göre (Şekil 4), 0° baskı yönelimi hem saf PLA hem de PLA-Wood numunelerinde en yüksek çekme dayanımının elde edildiği yönelim olarak öne çıkmıştır. Bu durum, yazdırma sırasında oluşan katman çizgilerinin yük yönüyle aynı doğrultuda yer almasının, katmanlar arasında daha güçlü bir bağlanmaya olanak tanıdığını göstermektedir. Saf PLA numunesi bu yönelimde 49.88 MPa ile en yüksek çekme dayanımını göstermiştir. Aynı yönelimde PLA-Wood numunesi ise 34.44 MPa değerine ulaşmıştır. Bu farklılık, saf PLA matrisine eklenen odun liflerinin katkısının çekme mukavemetine olumsuz katkı sağladığını işaret etmektedir. Literatürde de belirtildiği üzere, doğal lif takviyesi bazı durumlarda yapı bütünlüğünü zayıflatmakta, özellikle lif-matris ara yüzey etkileşimleri zayıf kaldığında kopma davranışında erken kırılmalar meydana gelebilmektedir (Peltola ve ark., 2014; Wang ve ark., 2017). Baskı yönelimi 45° olduğunda, tüm numunelerde önemli ölçüde çekme dayanımı kaybı gözlenmiştir. PLA numunesi bu yönelimde 29.33 MPa değerinde dayanım sergilerken, PLA- Wood için bu değer 15.94 MPa ile sınırlı kalmıştır. Bu azalma, filament malzeme yöneliminin yük doğrultusuyla açısal fark oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Ara katmanlar boyunca oluşan yük transferi zayıflamış, özellikle PLA-Wood numunelerinde katmanlar arası gözeneklilik artışıyla birlikte çatlak ilerlemesi kolaylaşmıştır (Anaç ve Koçar, 2024). Benzer şekilde, 90° baskı yöneliminde de mekanik performans minimum seviyeye inmiştir. Bu yönelimde katmanlar arası bağlar yük yönüne dik konumlandığından dolayı, yük taşıma kapasitesi belirgin biçimde düşmüştür. Saf PLA numunesi bu durumda 25.68 MPa değerinde bir çekme dayanımı gösterirken, PLA-Wood yalnızca 12.30 MPa değerine ulaşabilmiştir. Elde edilen bulgular, EYM yöntemiyle üretilen yapıların çekme dayanımının yalnızca kullanılan malzemeye değil, aynı zamanda baskı parametrelerine de oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir. Odun lifi katkısının baskı sırasında dağılımı, zayıf bağlanma yüzeyleri oluşturmaması ve yapısal düzensizliklere neden olması gibi etkenler, mekanik performansta olumsuz sonuçlar doğurmuştur. Bu kapsamda, yönelim yönünün optimizasyonu ve katkı malzeme oranının kontrollü ayarlanması, kompozit filamentlerin performansını artırmak adına dikkate alınması gereken temel faktörlerdir.



Şekil 4. Saf PLA ve PLA-Wood numunelerinin çekme dayanımları

Şekil 5'te numunelerin kırılma yüzeyleri verilmiştir. Saf PLA malzemede kopmanın yönlenme açısına bağlı olmaksızın benzer noktalardan gerçekleştiği görülmektedir. Çekme numunelerinde düz ve keskin şekilde kopma olmuştur. PLA-Wood numuneler incelendiğinde,

kopma noktalarının ve kırılma yüzeylerinin benzer olduğu anlaşılmaktadır. 0° baskı yöneliminde PLA-Wood numunelerde ölçüm uzunluğu boyunca gerilme çizgileri görünürdür. Numunelere uygulanan kuvvet, malzeme bağ kuvvetini aşınca malzeme kırılmıştır.

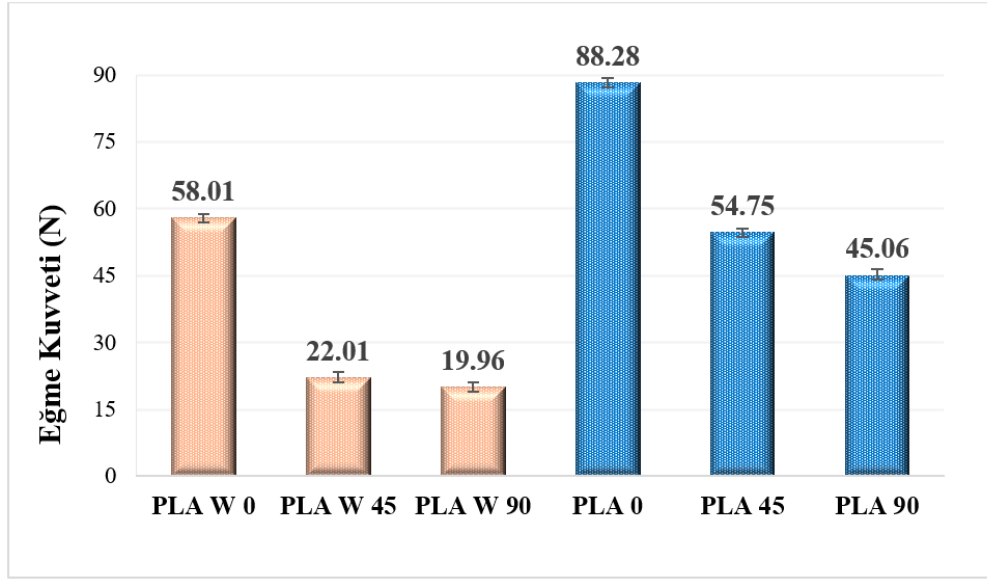


Şekil 5. Çekme sonrası numunelerin kırılma yüzeyleri a) Saf PLA 0° b) Saf PLA 45° c) Saf PLA 90° d) PLA-Wood 0° e) PLA-Wood 45° f) PLA-Wood 90°

3.2 Eğme testi sonuçları

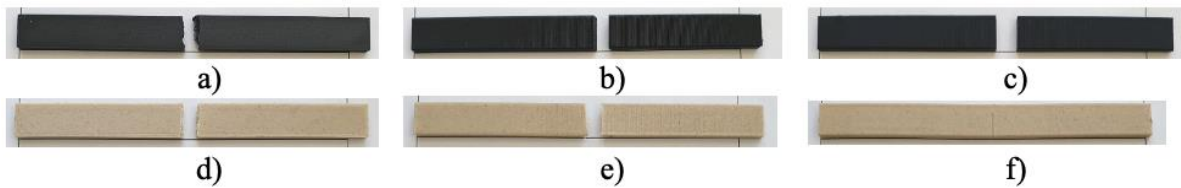
Elde edilen eğme testi sonuçları, tıpkı çekme testlerinde olduğu gibi hem malzeme bileşiminin hem de baskı yöneliminin mekanik davranış üzerinde önemli etkileri bulunduğunu göstermektedir (Şekil 6). Eğme kuvveti açısından en yüksek değer, 0° baskı yönelimiyle üretilen saf PLA numunesinde ölçülmüş olup, bu numune 88.28 N değerine ulaşmıştır. Aynı yönelimde PLA-Wood numunesi ise 58.01 N ile daha düşük bir performans sergilemiştir. Bu durum, çekme testleriyle tutarlı bir şekilde, doğal katkı malzemesi olarak eklenen odun liflerinin matrisle yeterince bütünleşememesi sonucunda eğme kuvvetini düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Literatürde de vurgulandığı üzere, doğal takviyeler genellikle elastisite modül üzerinde olumlu etkiler gösterebilse de, ara yüzey bağlarının zayıf olması durumunda eğilme mukavemeti üzerinde olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir (Zandi ve ark., 2020).

Baskı yönelimi 45°'ye değiştirildiğinde, her iki malzemede de eğme kuvvetinde ciddi bir azalma gözlemlenmiştir. Saf PLA numunesi bu yönelimde 54.75 N gösterirken, PLA-Wood numunesi 22.01 N'da kalmıştır. Bu davranış, katman çizgilerinin yük doğrultusuyla çapraz bir açı yapması nedeniyle oluşan yapının zayıflamasıyla açıklanabilir (Garg ve ark., 2017). Gardi ve ark. ABS malzemelerde 60° raster açısının çekme dayanımını maksimize ettiğini, 30°'nin ise eğilme dayanımı için optimal olduğunu belirtmiştir (Garg ve ark., 2017). Ancak PLA-Wood gibi kompozitlerde, lif yöneliminin kontrolsüz olması ve ahşap-matris ara yüzey bağlarının zayıflığı nedeniyle, saf polimerlerde geçerli olan bu optimizasyon kuralları doğrudan uygulanamamaktadır. Gurralla ve Regalla, EYM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik dayanımının, filamentler arası bağlanma kalitesiyle doğrudan ilişkili olduğunu belirtmiştir (Gurralla ve Regalla, 2014). Bu bulgular, doğal lif takviyeli kompozitlerde gözlemlenen düzensiz yük aktarımının, filamentler arası bağ yapısını zayıflatarak kırılma davranışını olumsuz yönde etkileyebileceğine işaret etmektedir. 90° baskı yönelimi ile üretilen numunelerde ise eğme kuvveti en düşük seviyelere inmiştir. PLA-Wood numunesi bu durumda yalnızca 19.96 N eğme kuvveti gösterebilirken, saf PLA için bu değer 45.06 N olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, 90° yönelimde katmanlar arası yapışmanın yük taşıma kabiliyetini oldukça sınırladığını ve özellikle kompozit yapılar (PLA- Wood) için bu etkinin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir (Domingo-Espin ve ark., 2015). Katmanlar arasında eksik birleşme, boşluk oluşumu ve lif yönelimindeki problemler, eğilme yükleri altında çatlak başlatıcı noktalar olarak işlev görerek kırılmayı hızlandırmıştır (Sood ve ark., 2012).



Şekil 6. Eğme kuvvetinin parça baskı oryantasyon yönüne göre dağılımı

Genel olarak, elde edilen bulgular, EYM sürecinde baskı yöneliminin ve malzeme seçiminin eğilme dayanımı üzerinde yüksek derecede etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Saf PLA malzemeler, tüm yönelimlerde PLA-Wood kompozitlerden daha üstün performans sergilemiştir. Özellikle 0° yönelimi, filamentlerin yük doğrultusuna paralel hizalanması sayesinde eğilme davranışı açısından en avantajlı geometriyi sağlamaktadır. Odun unu katkılı kompozitler ise, mekanik dayanım açısından optimizasyon gerektiren bir yapıya sahiptir. Bu bağlamda, kompozit filamentlerde kullanılan doğal katkıların homojen dağılımı, boyut kontrolü ve ara yüzey bağ kuvvetleri üzerine odaklanan ilave iyileştirme çalışmaları, performans artırımı açısından kritik önem taşımaktadır. Şekil 7’de saf PLA ve PLA-Wood numunelerinin eğme testi sonrasındaki kırılma yüzeyleri verilmiştir. Eğme testinde saf PLA numunelerin tamamen kırılmış ve PLA-Wood numuneler ise yönelim açısına bağlı olarak ikiye ayrılmıştır. Her iki malzeme için 0° yönelim açısında kırılma bölgesinde daha sünek bir davranış sergilendiği ve uygulanan yük hattı boyunca kırılmanın gerçekleştiği görülmüştür.

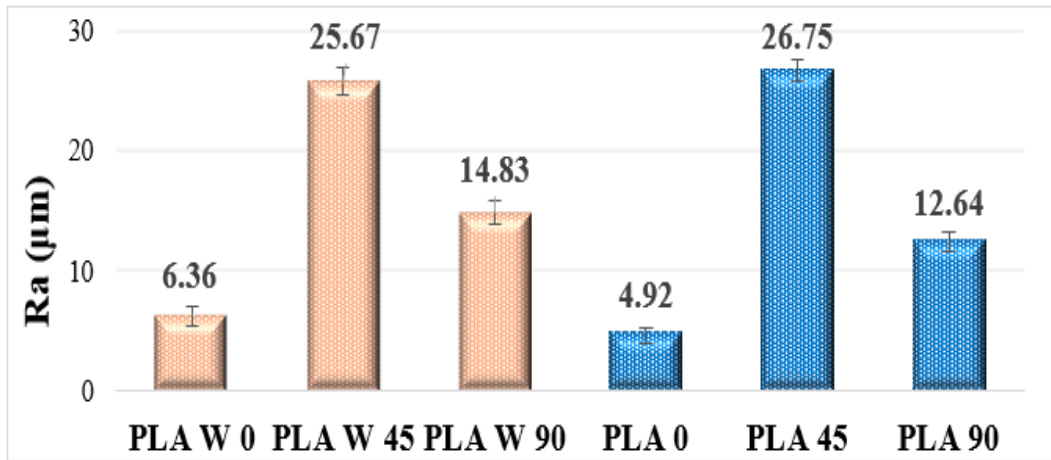


Şekil 7. Eğme sonrası numunelerin kırılma yüzeyleri a) Saf PLA 0° b) Saf PLA 45° c) Saf PLA 90° d) PLA-Wood 0° e) PLA-Wood 45° f) PLA-Wood 90 °

3.3 Yüzey pürüzlülüğü sonuçları

Şekil 8’de, basım oryantasyon yönüne bağlı olarak aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları, baskı yöneliminin hem saf PLA hem de PLA-Wood numunelerinde yüzey kalitesini doğrudan etkilediğini göstermiştir. Düşük baskı yönelim açılarında, 3B yazdırmada tepe genişliğinin katman yüksekliğine karşılık geldiği düzenli profiller elde edilmektedir (Buj-Corral ve ark. 2019). En düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri 0° baskı yöneliminde elde edilirken, 45° yöneliminde pürüzlülükte ciddi artışlar gözlemlenmiştir. Nozul hareketinin katman çizgileriyle aynı doğrultuda gerçekleştiği 0°

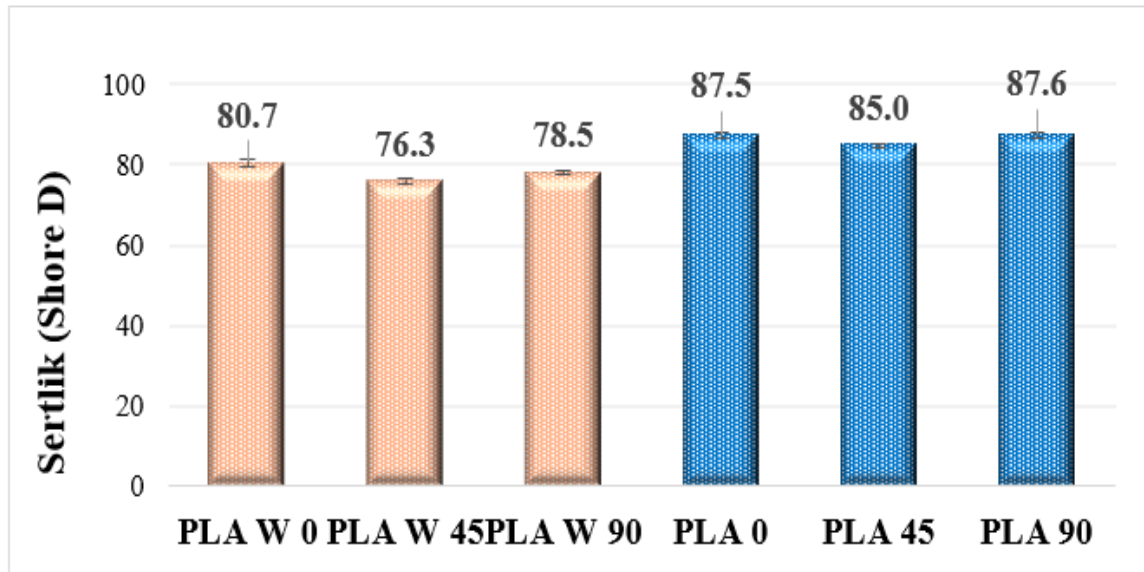
yöneliminde, yüzeyin daha düzgün oluşması sağlanırken; 45° yönelimin karmaşık katman geçişlerine neden olarak yüzeyde daha fazla düzensizlik oluşturduğu gözlenmiştir. 90°'lik baskı yönelim açısında, destek kullanmaya gerek kalmaz. 45°'de ise destek ihtiyacı vardır. Bu nedenle 45°'de yüzey pürüzlülüğü en yüksek değerdedir. Saf PLA numunesi, çoğunlukla PLA- Wood'a kıyasla daha düşük Ra değerleri göstermiştir. Özellikle 0° yöneliminde saf PLA, 4.92 μm pürüzlülük değeriyle en düzgün yüzeyi sağlamıştır. Aynı yönelimde PLA-Wood'un yüzey pürüzlülüğü 6.36 μm olarak ölçülmüştür. Bu fark, PLA-Wood içeriğinde bulunan odun parçacıklarının baskı sırasında düzensiz yerleşerek yüzeyde mikroskobik çıkıntılara neden olmasıyla ilişkilendirilebilir. Literatürde de belirtildiği üzere, doğal lif veya partikül içeren kompozit filamentler, homojen olmayan yapı ve termal genleşme farkları nedeniyle yüzey kalitesini düşürebilmektedir (Vinayagamoorthy ve ark., 2019). 45° baskı yöneliminde hem saf PLA hem de PLA-Wood numunelerinde yüzey pürüzlülüğünde belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Saf PLA numunesi bu açıda 26.75 μm ile en yüksek pürüzlülük değerine ulaşırken, PLA-Wood ise 25.67 μm ile yüksek bir pürüzlülük sergilemiştir. Bu yönelimde katman çizgilerinin çapraz yerleşmesi, katman geçişlerinde keskin yükselti oluşturmakta ve nozulün iz bırakma etkisini artırmaktadır. 90° yönelimi, pürüzlülük değerlerinin orta seviyede görüldüğü bir diğer baskı yönelimi olarak öne çıkmıştır. PLA-Wood bu açıda 14.83 μm yüzey pürüzlülüğü gösterirken, saf PLA'da bu değer 12.64 μm olarak ölçülmüştür. 90° yönelimde katmanların üst üste binmesi malzemenin yük doğrultusuna dik yerleşmesine sebep olarak, katman sınırlarında dalgalı yüzey oluşumuna neden olmuş, ancak bu durumda dahi 45° yönelime kıyasla daha düzenli bir yapı ortaya koyulmuştur. Bu bulgular, katman yöneliminin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini ortaya koyan önceki çalışmalarla da örtüşmektedir. Nitekim Bintara vd. (Bintara ve ark. 2023), saf PLA malzemesi üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında, 45° katman yöneliminin en yüksek yüzey pürüzlülüğünü (Ra 11.79 μm), 90° yönelimin ise en düşük pürüzlülüğü (Ra 0.98 μm) verdiğini bildirmişlerdir. Bu durum, katman yöneliminin yüzey morfolojisi üzerindeki belirleyici rolünü desteklemektedir. Elde edilen veriler, yüzey kalitesinin yalnızca kullanılan malzemeye değil, aynı zamanda baskı yönelimine de yüksek oranda bağlı olduğunu göstermektedir. Özellikle PLA-Wood gibi odun unu katkılı filamentlerde, ahşap unu katkısının dağılımı ve baskı sırasında oluşan bozulmalar yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır. Bu nedenle, estetik açıdan yüksek yüzey kalitesi beklenen uygulamalarda hem yönelim açısının dikkatli seçilmesi hem de katkı malzemelerinin oran ve dağılımının optimize edilmesi gerekmektedir.



Şekil 8. Basım oryantasyon yönüne göre yüzey pürüzlülük değerleri

3.4 Sertlik ölçüm sonuçları

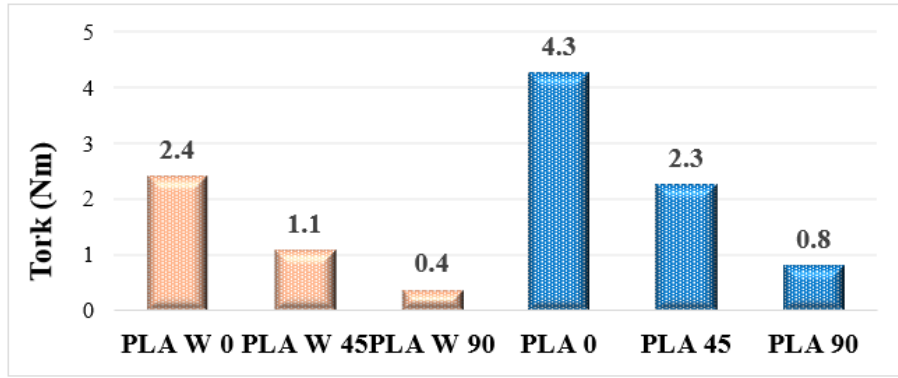
Elde edilen sertlik ölçüm sonuçları, tıpkı eğme ve çekme testlerinde olduğu gibi hem malzeme bileşiminin hem de baskı yöneliminin mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 9). Sertlik değerleri, saf PLA'nın tüm baskı yönelimlerinde (0°: 87.5, 45°: 85.0, 90°: 87.6 Shore D) PLA-Wood'a göre (0°: 80.7, 45°: 76.3, 90°: 78.5 Shore D) daha yüksek değerler sergilediğini göstermektedir. Bu fark, saf PLA'nın homojen yapısı ve ahşap unu içermemesinin malzeme bütünlüğünü korumasıyla açıklanabilirken, PLA-Wood'taki düşük değerler ahşap unu katkısının neden olduğu mikro boşluklar ve zayıf ara yüzey bağlarından kaynaklanmaktadır (De Castro Magalhães ve ark. 2025). Özellikle 45° yöneliminde her iki malzemede de gözlenen sertlik düşüşü, katman çizgilerinin yük doğrultusuna açılı yerleşiminin yapısal zayıflamaya yol açtığını ortaya koymaktadır. Literatürle uyumlu şekilde, 0° ve 90° yönelimlerinin daha yüksek sertlik sağladığı görülmüştür. Narlıoğlu, %30 kayın ağacı unu içeren PLA kompozit filament kullanarak farklı katman kalınlıklarında ürettikleri numunelerde Shore D sertliğinin yaklaşık 73 olduğunu bildirmiştir (Narlıoğlu, 2021). Jiang ve ark. (2021) ise yaptıkları çalışmada, mısır samanı tozu içeren PLA kompozitlerinin Shore D sertlik değerlerinin 70 ile 80 arasında değiştiğini raporlamıştır. Bu bulgular, mevcut çalışmada PLA-Wood malzemesinde gözlemlenen daha düşük sertlik değerlerini destekler niteliktedir.



Şekil 9. Basım oryantasyon yönüne göre sertlik değerleri

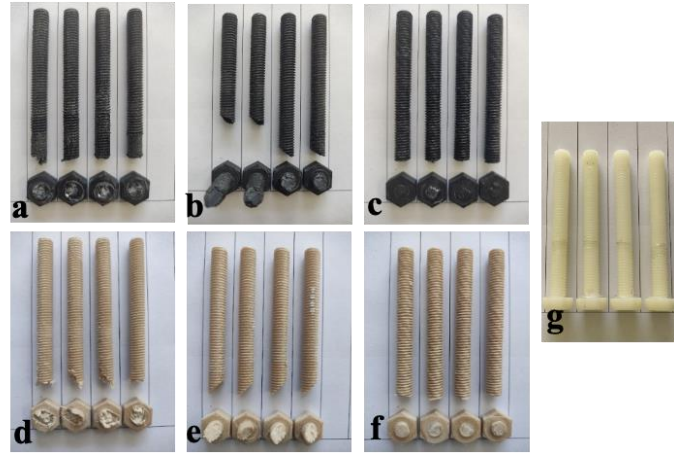
3.5 Tork ölçüm sonuçları

Üç farklı oryantasyon açısı (0°, 45°, 90°) ve iki farklı filamentten (saf PLA ve PLA-Wood) üretilen cıvatalara ve ticari olarak temin edilen PA 6.6 M8x70 cıvatalara güvenli yük altındaki mukavemetlerini anlayabilmek için tork testleri yapılmıştır. Testler sırasında cıvatalar mengeneyle sabitlenmiş ve tork ölçer ile sıkılmıştır (Geratech DTWI-30i model dijital tork anahtarı). Her malzeme grubundan dört numune test edilmiş ve ortalama ölçüm değerleri alınmıştır. Test sonuçları, farklı yönelim açılarıyla üretilen numunelerin M8x70 cıvatalar üzerindeki torku anlamlı düzeyde etkilediğini ortaya koymuştur (Şekil 10).



Şekil 10. M8x70 cıvataların tork değerleri

Odununu dolgu PLA numunelerde baskı yönelim açısı arttıkça tork değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Bu numunelerde sırasıyla 0° açıyla 2.4 Nm, 45° açıyla 1.1 Nm ve 90° açıyla 0.4 Nm tork değerleri elde edilmiştir. Benzer bir eğilim standart saf PLA numunelerde de tespit edilmiş; 0° açıyla 4.3 Nm olan tork dayanımı, 45°'de 2.3 Nm'ye ve 90°'de 0.8 Nm'ye düşmüştür. Bu bulgular, yönelim açısındaki artışın katmanlar arası yapışma direncini azalttığını ve dolayısıyla tork dayanımını düşürdüğünü göstermektedir. Ayrıca, odununu dolgu PLA'nın standart saf PLA'ya kıyasla daha düşük tork dayanımı sergilemesi, dolgu malzemesinin mekanik performansı olumsuz etkileyebileceğine işaret etmektedir. Sonuçlar, eklemeli imalatla üretilen bağlantı elemanlarında yöneliminin kritik bir tasarım parametresi olduğunu vurgulamaktadır. Şekil 11'de saf PLA, PLA-Wood ve Poliamid 6.6 cıvataların tork testi sonrasında kopan parçaları gösterilmiştir.



Şekil 11. Saf PLA, PLA-Wood ve Poliamid 6.6 cıvataların tork ölçümü sonrasında görünümü
a) Saf PLA 0° b) Saf PLA 45° c) Saf PLA 90° d) PLA-Wood 0° e) PLA-Wood 45° f) PLA-Wood 90° g) Poliamid 6.6

Saf PLA ve PLA-Wood malzemede 0° ve 90°'de cıvata başının gövdeyle birleştiği yerden kopma olmuşken, 45° için açılı kırılma gerçekleşmiştir. Poliamid 6.6 cıvatalar tork ölçümü sırasında diş sıyrılmıştır ve kopma gerçekleşmemiştir. Montaj ve demontaj durumunda bazen cıvata dişlerinin tutuş kabiliyetini kaybetmesiyle sıyrılmaya veya aşınmaya gibi problemlerle karşılaşılabilir. Bu durum, dişlerin daha hızlı deforme olabildiği veya aşınabildiği plastikler ve daha yumuşak metaller gibi malzemelerde daha belirgindir. Bu çalışmada Poliamid 6.6 cıvatada tork dayanımı 2.52 Nm olarak ölçülmüştür. Ölçülen değer, saf PLA'da 0° yönelimle elde edilen tork değerinden daha düşüktür.

4 Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, EYM yöntemiyle üretilen saf (katkısız) PLA ve PLA-Wood numuneler için çekme, eğme, sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve tork testleri gerçekleştirilerek baskı yöneliminin (0° , 45° , 90°) mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Saf PLA ve PLA-Wood cıvatalar, Poliamid 6.6 cıvata ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Baskı yönelimi, hem mekanik performans hem de yüzey görünümü üzerinde belirleyici bir parametre olmuştur. Özellikle 0° yöneliminde saf PLA, 49.88 MPa çekme dayanımı ve 88.28 N eğme kuvveti göstermiştir. Bu değerler, 90° yönelimle kıyaslandığında sırasıyla %94 ve %96 daha yüksektir. Katman çizgilerinin yük doğrultusuna paralel yerleşmesi, yük aktarımını güçlendirmiştir. 45° ve 90° yönelimlerinde, tabakalar arası bağ zayıflamış ve yük aktarımı düzensizleşmiştir.
- Saf PLA, tüm yönelimlerde PLA-Wood kompozitlere kıyasla daha yüksek mekanik performans göstermiştir. 0° yöneliminde PLA-Wood, 34.44 MPa çekme dayanımı ve 58.01 N eğme kuvveti sergileyerek, saf PLA'ya göre sırasıyla %45 ve %52 daha düşük kalmıştır. Odun lifi katkısı, matris ara yüzeyinde zayıf bağlanmaya neden olarak performansı düşürmüştür.
- Yüzey pürüzlülüğü açısından en düşük değer 0° yöneliminde ölçülmüştür. Saf PLA bu yönelimde $4.92 \mu\text{m}$ Ra değeri gösterirken, PLA-Wood $6.36 \mu\text{m}$ ile %29 daha pürüzlü yüzeye sahiptir. 45° yöneliminde saf PLA'da $26.75 \mu\text{m}$ gibi çok daha yüksek bir Ra değeri tespit edilmiştir.
- Tork testlerinde saf PLA malzeme, PLA-Wood'a göre daha yüksek tork dayanımı sağlamıştır. 0° yöneliminde saf PLA 4.3 Nm, PLA-Wood ise 2.4 Nm değerlerine ulaşmıştır. Bu, yaklaşık %79'luk bir farka karşılık gelmektedir. 90° yöneliminde tork dayanımı saf PLA'da 0.8 Nm, PLA-Wood'da ise sadece 0.4 Nm olarak ölçülmüştür.
- Ticari poliamid 6.6 cıvata, 2.52 Nm tork dayanımıyla sadece saf PLA'nın 0° yönelimindeki numunesinden daha düşük kalmıştır. Diğer tüm saf PLA ve PLA-Wood numuneleri, PA6.6'ya kıyasla daha düşük performans göstermiştir. Bu, 3B baskı ile üretilen cıvataların ancak belirli yönelim ve malzeme kombinasyonlarında geleneksel malzemelerle rekabet edebileceğini göstermektedir.
- Bu çalışma, baskı parametrelerinin ve malzeme bileşiminin mekanik özellikler üzerindeki kritik rolünü ortaya koymuştur. Özellikle 0° yönelimi, mekanik testlerin tamamında en avantajlı sonuçları vermiştir. Kompozit filamentlerde ise lif/toz dağılımı, bağ yapısı ve katkı oranı gibi parametrelerin daha dikkatli optimize edilmesi gerektiği açıktır.

Yazar Katkıları

Abdulsamed Arık: Görselleştirme, Numunelerin hazırlanması, Deneylerin yapılması. **Nergizhan Anaç:** Metodolojinin belirlenmesi, Kavramsallaştırma, Literatür taraması, Makale Taslak oluşturma, Makale yazma ve düzenleme. **Vahap Neccaroğlu:** Literatür taraması, Görselleştirme, Makale yazma ve düzenleme. **Oğuz Koçar:** Metodolojinin belirlenmesi, Kavramsallaştırma, Makale Taslak oluşturma, Makale yazma ve düzenleme, Deney sonuçlarının incelenmesi. **Ali Ulaş Gümüşlüoğlu:** Görselleştirme, Numunelerin hazırlanması, Deneylerin yapılması. **Hikmet Sefa Dönmez:** Literatür taraması, Numunelerin hazırlanması, Deneylerin yapılması

Finansal destek beyanı

Finansal destek alınmamıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- ASTM D638., (2022). Standard test method for tensile properties of plastics. In *ASTM International*. Retrieved from <https://store.astm.org/d0638-22.html>
- ASTM D790., (2017). Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. *ASTM International*. Retrieved from <https://store.astm.org/d0790-17.html>
- ASTM D2240., (2021). Standard test method for rubber property/durometer hardness. *ASTM International*. Retrieved from <https://store.astm.org/d2240-15r21.html>
- Anaç, N. Koçar. O., (2024). Malik, V., Tiwary, V., and Padmakumar, A. (2024). Investigation of the effect of bonding parameters on the adhesive bonding strength of parts produced by FDM-3D Method, Malik, V., Tiwary, V., and Padmakumar, A. (Ed.), *Post-Processing of Parts and Components Fabricated by Fused Deposition Modeling: Techniques and Advancements (1st edition, ss. 123-142)*. Routledge Taylor & Francis Group, DOI: [10.1201/9781032665351](https://doi.org/10.1201/9781032665351)
- Avcı, B., Çavdar, A.D., and Mengeloğlu, F., (2022). Odun polimer kompozitlerin doğal ve yapay (suni) yaşlandırma sonrası özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, *Ormancılık Araştırma Dergisi*, 9(Özel Sayı), 264–270, DOI: [10.17568/ogmoad.1091198](https://doi.org/10.17568/ogmoad.1091198)
- Ayılmış, N., Kariz, M., Kwon, J. H., and Kitek Kuzman, M. (2019). Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5), 2195–2200, DOI: [10.1007/s00170-019-03299-9](https://doi.org/10.1007/s00170-019-03299-9)
- Bharat, N., Jain, R., and Bose, P. S. C. (2024). A comprehensive overview on additive manufacturing processes: materials, applications, and challenges, In V. S. Sharma, U. S. Dixit, A. Gupta, R. Verma, and V. Sharma (Eds.), *Machining and Additive Manufacturing* (pp. 95–105).
- Bintara, R., Pradana, Y., Aminnudin, A., and Suryanto, H. (2023). The orientation and high-quality effect of deposit layer to surface roughness on FDM 3D Printed Part. *Key Engineering Materials*, 940, 95–99, DOI: [10.4028/p-29nh6i](https://doi.org/10.4028/p-29nh6i)
- Buj-Corral, I., Domínguez-Fernández, A., and Durán-Llucià, R. (2019). Influence of print orientation on surface roughness in fused deposition modeling (FDM) Processes. *Materials*, 12(23), DOI: [10.3390/ma12233834](https://doi.org/10.3390/ma12233834)
- Chen, S., Khan, S. B., Li, N., and Xiao, C. (2025). In-depth analysis of sintering, exposure time, and layer height (um) in LRS 3D printed devices with DLP, *Journal of Manufacturing Processes*, 133, 576–591, DOI: [10.1016/J.JMAPRO.2024.11.060](https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2024.11.060)
- De Castro Magalhães, F., and Campos Rubio, Juan Carlos. (2025). Enhancing mechanical properties and structural behaviour of PLA/wood composites through annealing at 50°C and 100°C, *Journal of Composite Materials*, 00219983251329111, DOI: [10.1177/00219983251329111](https://doi.org/10.1177/00219983251329111)
- Dembri, I., Belaadi, A., Lekrine, A., Jawaid, M., Ismail, A. S., and Ghernaout, D., (2024). Effect of alkaline treatment on the thermo-physicochemical and mechanical properties of

- biochar powder/Washingtonia robusta fibers/PLA hybrid biocomposites, *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 9735–9751, DOI: [10.1016/J.JMRT.2024.12.018](https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2024.12.018)
- Doğru, A., Kaçak, M., and Seydibeyoğlu, M., (2024). Examination of mechanical properties of fasteners produced with PET and PLA Materials in extrusion-based additive manufacturing method. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 8, 407–415, DOI: [10.46519/ij3dptdi.1549143](https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1549143)
- Domingo-Espin, M., Puigoriol-Forcada, J. M., Garcia-Granada, A. A., Llumà, J., Borros, S., and Reyes, G. (2015). Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts, *Materials & Design*, 83, 670–677, DOI: [10.1016/J.MATDES.2015.06.074](https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2015.06.074)
- Drazan, T., Chadima, V., Jasik, K., Sarzyński, B., Krchova, M., and Dobrocky, D., (2025). Analysis of 3D printed metric nuts manufactured by the MEX method from ASA material. *MM Science Journal*, 2025, DOI: [10.17973/MMSJ.2025_06_2025063](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2025_06_2025063)
- Durmaz, S. (2022). Mermer atıklarının düz presleme yöntemiyle üretilen odun plastik kompozitlerinde değerlendirilmesi, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 24(2), 220–227, DOI: [10.24011/barofd.1084516](https://doi.org/10.24011/barofd.1084516)
- Efe, H., and İmirzi, H. Ö. (2007). Mobilya üretiminde kullanılan çeşitli bağlantı elemanlarının mekanik davranış özellikleri, *Politeknik Dergisi*, 10(1), 93–103.
- Er, A. O., and Aydın, O. M. (2023). Ergiyik filament ile imalat yönteminde kullanılan PLA ve çelik katkılı PLA filament malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(2), 1285–1302, DOI: [10.17341/gazimmfd.1276420](https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1276420)
- Fountas, N. A., Zaoutsos, S., Chaidas, D., Kechagias, J. D., and Vaxevanidis, N. M. (2023). Statistical modelling and optimization of mechanical properties for PLA and PLA/Wood FDM materials, *Materials Today: Proceedings*, 93, 824–830, DOI: [10.1016/J.MATPR.2023.08.276](https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.08.276)
- Garg, A., Bhattacharya, A., and Batish, A. (2017). Chemical vapor treatment of ABS parts built by FDM: Analysis of surface finish and mechanical strength, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5), 2175–2191, DOI: [10.1007/s00170-016-9257-1](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9257-1)
- Górski, F., Kuczko, W., and Wichniarek, R. (2013). Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using fused deposition modelling technology. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 7, 27–35, DOI: [10.5604/20804075.1062340](https://doi.org/10.5604/20804075.1062340)
- Gurralla, P. K., and Regalla, S. P. (2014). Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling, *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3), 141–149, DOI: [10.1080/17452759.2014.913400](https://doi.org/10.1080/17452759.2014.913400)
- Harshitha, V., and Rao, S. S. (2019). Design and analysis of ISO standard bolt and nut in FDM 3D printer using PLA and ABS materials, *Materials Today: Proceedings*, 19, 583–588, DOI: [10.1016/J.MATPR.2019.07.737](https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.07.737)
- Jadhav, A., and Jadhav, V. S. (2022). A review on 3D printing: An additive manufacturing technology. *Materials Today: Proceedings*, 62, 2094–2099, DOI: [10.1016/J.MATPR.2022.02.558](https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.02.558)

- Jasiński, W., Szymanowski, K., Nasiłowska, B., Barlak, M., Betlej, I., Prokopiuk, A., and Borysiuk, P. (2025). 3D Printing Wood–PLA composites: The impact of wood particle size. *Polymers*, 17(9), 1165, 1-16, DOI: [10.3390/polym17091165](https://doi.org/10.3390/polym17091165)
- Jiang, J., Gu, H., Li, B., and Zhang, J. (2021). Preparation and Properties of Straw/PLA Wood Plastic Composites for 3D Printing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 692(3), 32004, DOI: [10.1088/1755-1315/692/3/032004](https://doi.org/10.1088/1755-1315/692/3/032004)
- Kechagias, J. D., Zaoutsos, S. P., Chaidas, D., and Vidakis, N. (2022). Multi-parameter optimization of PLA/Coconut wood compound for fused filament fabrication using robust design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(7), 4317–4328, DOI: [10.1007/s00170-022-08679-2](https://doi.org/10.1007/s00170-022-08679-2)
- Lekrine, A., Belaadi, A., Dembri, I., Jawaid, M., Ismail, A. S., Abdullah, M. M. S., Ghernaout, D. (2024). Thermomechanical and structural analysis of green hybrid composites based on polylactic acid/biochar/treated W. filifera palm fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 9656–9667, DOI: [10.1016/J.JMRT.2024.06.033](https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2024.06.033)
- Narlıoğlu, N., (2021). 3B yazıcı kullanılarak odun-PLA kompozit filamentinden mobilya bağlantı elemanlarının yazdırılması ve katman kalınlıklarının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 183–192, DOI: [10.33725/mamad.1026248](https://doi.org/10.33725/mamad.1026248)
- Narlıoğlu, N., Salan, T., and Alma, M. H. (2021). Properties of 3D-printed wood sawdust-reinforced PLA composites, *BioResources*, 16(3), 5467–5480, DOI: [10.15376/biores.16.3.5467-5480](https://doi.org/10.15376/biores.16.3.5467-5480)
- Peltola, H., Pääkkönen, E., Jetsu, P., and Heinemann, S., (2014). Wood based PLA and PP composites: Effect of fibre type and matrix polymer on fibre morphology, dispersion and composite properties, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 61, 13–22, DOI: [10.1016/J.COMPOSITESA.2014.02.002](https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2014.02.002)
- Pozo Morales, A., Güemes, A., Fernandez-Lopez, A., Carcelen Valero, V., and De La Rosa Llano, S. (2017). Bamboo–Polylactic Acid (PLA) Composite Material for Structural Applications, *Materials*, 10(11), DOI: [10.3390/ma10111286](https://doi.org/10.3390/ma10111286)
- Singh, R. (2013). Some investigations for small-sized product fabrication with FDM for plastic components. *Rapid Prototyping Journal*, 19(1), 58–63. DOI: [10.1108/13552541311292745](https://doi.org/10.1108/13552541311292745)
- Sood, A. K., Ohdar, R. K., and Mahapatra, S. S. (2012). Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 81–90. [10.1016/J.JARE.2011.05.001](https://doi.org/10.1016/J.JARE.2011.05.001)
- Stoof, D., Pickering, K., and Zhang, Y. (2017). Fused Deposition Modelling of Natural Fibre/Polylactic Acid Composites, *Journal of Composites Science*, 1(1), DOI: [10.3390/jcs1010008](https://doi.org/10.3390/jcs1010008)
- Ulkir, O., and Akgun, G. (2024). Prediction of flexural strength with fuzzy logic approach for fused deposition modeling of polyethylene terephthalate glycol components, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(9), 4367–4376, DOI: [10.1007/s11665-024-09291-z](https://doi.org/10.1007/s11665-024-09291-z)
- URL-1 (2025) PLA Wood Filament, from <https://www.filameon.com/urun/pla-wood> Last access 30.06. 2025

- URL-2 (2025) PLA Filament, from <https://www.filameon.com/urun/pla> Last access 03.07.2025
- Vinayagamoorthy, R., Konda, V., Tonge, P., Koteswar, T. N., and Premkumar, M., (2019). Surface roughness analysis and optimization during drilling on chemically treated natural fiber composite, *Materials Today: Proceedings*, 16, 567–573, DOI: [10.1016/J.MATPR.2019.05.129](https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.05.129)
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., and Hui, D., (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective, *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–458, DOI: [10.1016/J.COMPOSITESB.2016.11.034](https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2016.11.034)
- Yang, M., Xu, Y., Xin, X., Zeng, C., Li, Y., Lin, C., Leng, J. (2025). 4D Printed Cardiac Occlusion Device with Efficient Anticoagulation, Proendothelialization, and Precise Localization, *Advanced Functional Materials*, 2412533, DOI: [10.1002/adfm.202412533](https://doi.org/10.1002/adfm.202412533)
- Zandi, M. D., Jerez-Mesa, R., Lluma-Fuentes, J., Roa, J. J., and Travieso-Rodriguez, J. A. (2020). Experimental analysis of manufacturing parameters' effect on the flexural properties of wood-PLA composite parts built through FFF, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9), 3985–3998, DOI: [10.1007/s00170-019-04907-4](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04907-4)
- Zolfaghari, A., Behraves, A. H., and Shahi, P., (2013). Comparison of mechanical properties of wood–plastic composites reinforced with continuous and noncontinuous glass fibers, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 28(6), 791–805, DOI: [10.1177/0892705713503676](https://doi.org/10.1177/0892705713503676)
- Zuo, X., Zhou, Y., Hao, K., Liu, C., Yu, R., Huang, A., Yang, Y. (2024). 3D printed all-natural hydrogels: flame-retardant materials toward attaining green sustainability. *Advanced Science*, 11(3), DOI: [10.1002/advs.202306360](https://doi.org/10.1002/advs.202306360)



Influence of carbon nanotubes on physical and mechanical properties of polypropylene/reed flour hybrid nano WPC

Seyyed Khalil HosseiniHashemi^{1*}, Maryam Jamshidi¹, Behzad Kord², Eshmaiel Ganjian³, Ahmad Ehsani⁴, Nadir Ayırlmis⁵

ABSTRACT: This study investigated the effect of incorporating multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) into polypropylene/reed flour (PP/RF) composites, aiming to enhance their mechanical and physical performance. Composites were prepared using various MWCNT concentrations (0, 1, 2, 3, and 5 phr) and characterized through mechanical testing, water absorption analysis, and scanning electron microscopy (SEM). The addition of MWCNTs significantly improved flexural and tensile properties, with peak tensile strength observed at 2 phr (approximately 15% higher than the control) and maximum flexural strength at 3 phr (approximately 15% higher). Impact resistance was also highest at 2 phr (around 10% increase compared to control). Although mechanical performance declined at 5 phr due to MWCNT agglomeration, this formulation exhibited the lowest water absorption (approximately 12% reduction) and thickness swelling, indicating improved hydrophobicity. SEM micrographs confirmed better filler dispersion at lower concentrations and agglomerate formation at higher loadings. The results highlight the reinforcing potential of MWCNTs, particularly at 2-3 phr, in improving both structural strength and moisture resistance.

Keywords: WPC, Reed flour, Carbon nanotube, Mechanical properties, Water absorption

Polipropilen/kamış unu hibrit nano WPC'nin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine karbon nanotüplerin etkisi

ÖZ: Bu çalışmada, çok katmanlı karbon nanotüplerin (MWCNT) polipropilen/kamış unu (PP/RF) kompozitlerine katılmasının mekanik ve fiziksel performans üzerine etkisi araştırılmıştır. Kompozitler, farklı MWCNT oranlarıyla (0, 1, 2, 3, ve 5 phr) hazırlanmış ve mekanik testler, su emme analizi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. MWCNT ilavesi, özellikle eğilme ve çekme özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağlamıştır; çekme mukavemeti 2 phr'de (yaklaşık 15% artış), eğilme mukavemeti ise 3 phr'de (yaklaşık 15% artış) en yüksek düzeye ulaşmıştır. Darbe dayanımı da 2 phr'da en yüksekti (kontrol ile karşılaştırıldığında yaklaşık %10 artış). MWCNT aglomerasyonu nedeniyle mekanik performans 5 phr'de düşmesine rağmen, bu formülasyon en düşük su emilimini (yaklaşık %12 azalma) ve kalınlık şişmesini göstererek hidrofobisitede iyileşme gösterdi. SEM mikrografları, daha düşük konsantrasyonlarda daha iyi dolgu dağılımı ve daha yüksek yüklemelerde aglomera oluşumunu doğruladı. Sonuçlar, MWCNT'lerin özellikle 2-3 phr'de hem yapısal dayanıklılığı hem de nem direncini iyileştirmede güçlendirme potansiyelini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Polipropilen kompozit, Kamış unu, Karbon nanotüp, Mekanik özellikler

Article history: Submitted: 20.07.2025, Revised: 17.09.2025, Accepted: 19.09.2025, Published: 15.11.2025, * sk.hashemi@iau.ac.ir

¹Department of Wood Science and Paper Technology, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran

²Department of Cellulosic Materials and Packaging, Chemistry and Petrochemistry Research Center, SRI, Karaj, Iran

³Concrete Corrosion Tech Ltd., Birmingham, UK

⁴Faculty of Engineering and Science, University of Greenwich, Chatham Maritime, Kent, UK

⁵Department of Wood Mechanics and Technology, Faculty of Forestry, Istanbul University-Cerrahpasa, Istanbul, Turkey

To cite: HosseiniHashemi S.K., Jamshidi, M., Kord, B., Ganjian, E., Ehsani, A., and Ayırlmis, N., (2025). Influence of carbon nanotubes on physical and mechanical properties of polypropylene/reed flour hybrid nano WPC, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 8 (2), 236-248, DOI: [10.33725/mamad.1746707](https://doi.org/10.33725/mamad.1746707)

1 Introduction

Composite materials are engineered by combining two or more constituents in such a way that the resulting material exhibits enhanced properties compared to its individual components. Typically, one of the substances acts as the matrix, which binds the structure together while the others serve as reinforcements such as fibers or particles (Saarela et al., 2007). These materials often outperform traditional ones in terms of mechanical characteristics, offering a favorable strength-to-weight ratio and environmental sustainability (Vuorinen, 2007).

The mechanical behavior of fiber-reinforced composites is largely influenced by factors such as the size and orientation of fibers, their distribution, the nature of bonding at the fiber-matrix interface, and the volume and aspect ratio of fibers (Siró and Plackett, 2010).

In recent years, wood/natural fiber plastic composites (WPCs) have gained considerable attention. These composites are made by embedding organic or inorganic fillers into a thermoplastic matrix such as polyethylene (PE), polypropylene (PP), or polyvinyl chloride (PVC). Wood-based fillers offer notable benefits over conventional fillers like glass fibers or minerals due to their low cost, light weight, renewability, and minimal abrasiveness to machinery. WPCs are increasingly utilized in applications ranging from construction and automotive parts to infrastructure (Selke and Wichman, 2004; Klyosov, 2004).

Ongoing research focuses on optimizing the performance of WPCs through adjusting raw material compositions, improving wood-plastic interface adhesion, and refining processing parameters (Lu et al., 2000; Mohanty et al., 2001; Kim, 2012).

Hosseinihashemi et al., (2023, 2025) demonstrated that thermal and chemical-additive treatments of wood/plastic composites improve their durability and resistance, while Bal et al., (2023) reported that adding fillers such as wood flour or glass flour can optimize the mechanical behavior of polymer-based composites. These findings suggest that combining nano-additives with natural fillers can effectively improve the performance of hybrid wood-plastic composites.

Previous studies have investigated polypropylene (PP) composites reinforced with natural fillers such as reed flour and nano-additives like multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) to improve their viscoelastic properties. It has been shown that the addition of MWCNTs can enhance storage modulus, loss modulus, and creep resistance, while also reinforcing shear behavior. In fiber-reinforced PP/wood-flour composites, improvements in mechanical properties have been observed; however, challenges such as filler-matrix incompatibility, non-uniform dispersion of nanotubes, and increased viscosity remain. The current study combines MWCNTs with reed flour in PP matrices to address these issues and develop composites with improved viscoelastic performance (Kord et al., 2017).

Carbon nanotubes (CNTs), known for their extremely high Young's modulus, are recognized as highly effective reinforcements when dispersed in polymer matrices. Their inclusion in composites significantly boosts mechanical properties such as tensile strength and stiffness, making them suitable for high-performance applications (Coleman et al., 2006).

In addition to mechanical enhancements, CNTs contribute to improved energy absorption (Sun et al., 2009), abrasion resistance (Giraldo et al., 2008), as well as enhanced thermal and electrical conductivity (Huang et al., 2005; Hollertz et al., 2011). Their high aspect ratio, the ratio of length to diameter, is central to their reinforcing capability (Cataldo et al., 2009).

Currently, CNT-reinforced composites are used across industries, including automotive, aerospace, defence, electronics, energy, and sporting goods (Kingston et al., 2014). The synergy of lightweight, high surface area, and exceptional mechanical strength makes CNTs ideal for enhancing composite performance.

Specifically, multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) improve the interfacial bonding between wood fibers and polymer matrices, which is critical in WPCs. These nanostructures act as particulate fillers at the nanoscale, facilitating stress transfer and enhancing durability (Kim and Mai, 1998; Ma et al., 2010). As demonstrated by Jin and Matuana (2010), integrating CNTs into the shell layer of WPCs enhances flexural properties, although the inherent flexibility of PVC may influence the overall mechanical behavior. Recent studies (Park et al., 2020; Jian et al., 2022; Łukawski et al., 2023; Zhao et al., 2025) have shown that integrating carbon nanotubes and graphene into wood-plastic composites can significantly enhance mechanical strength, moisture resistance, and flexural behavior.

This study aimed to explore the use of reed as an alternative to traditional wood fillers in WPCs while also examining the effect of including MWCNTs on the mechanical and physical performance of polypropylene/reed flour nanocomposites. The specific objective was to identify the optimum MWCNT content (2-3 phr) that would maximise tensile, flexural, impact and water resistance properties.

2 Material and Method

2.1 Materials

Reed stalks were supplied by Anzali lagoon in the northern Iranian province of Gilan to prepare lignocellulosic materials. The reed stalks were cut to pieces 2 cm in length by a band saw. Then, they were milled with a hammer mill. The obtained reed flour was ground with a Thomas-Wiley miller to a fine powder of 40-60 mesh size, and then oven-dried and stored in sealed plastic bags before processing.

Polymer matrix comprises an injection molding grade polypropylene (PP) with the commercial name of Z30, they were supplied in the form of pellets by Marun Petrochemical Complex in Iran. The melt flow index (MFI) of the provided PP was 25 g/10 min and had a density of 0.9 g/cm³.

Coupling agent, maleic anhydride grafted polypropylene (PP-g-MA) in the form of granules was supplied by Solvey (Solvey International Chemical Group, Brussels, Belgium) with a trade name of Priex 20070 (MFI = 64 g/10 min, grafted Ma 1 wt%).

MWCNTs nanostructures introduced to the composites were supplied by Iran's Research Institute of Petroleum Industry (RIPI). The outer and inner diameters of the MWCNTs were about 30 and 10 nm, respectively, and the purity was 90%.

2.2 Sample preparation

Reed flour was initially dried in an oven at 85 °C for 24 h to prepare the composite specimens. Then, PP, reed flour (RF), coupling agent (CA), and MWCNTs were mixed and packed, in accordance to the mix proportions given in Table 1.

Composites were produced through a two-stage process. In the first step, PP was fed to the mixing chamber. After PP melted, the compatibilizer and MWCNTs were added. Reed flour was then fed through after passing for 5 minutes. The total mixing time was 13 min. The mixing was carried out with a co-rotating twin-screw extruder (Dr. Collin GmbH, Germany).

Table 1. PP/RF nanocomposites mix proportions

Samples label	Reed flour (RF) (wt.%)	Polypropylene (PP) (wt.%)	MWCNTs (phr)	Coupling agent (CA) (phr)
50-50-0	50	50	0	2
50-50-1	50	50	1	2
50-50-2	50	50	2	2
50-50-3	50	50	3	2
50-50-5	50	50	5	2

The barrel had five consecutive heated zones with temperatures set at 165, 170, 175, 180, and 185 °C, respectively. The screw speed was 60 rpm. The product was recovered by guiding the molten extrudate into a standard cold water stranding bath. The cooled strands were pelletized using a pilot scale grinder, dried and stored in sealed plastic bags. In the second stage, test specimens were injection molded by an injection molder at a molding temperature of 180 °C and an injection pressure of 4 MPa (Eman machine, Aslanian Co., Iran) to produce standard ASTM specimens. Finally, specimens were conditioned at a temperature of 20 °C and a relative humidity of 50% before testing according to ASTM D618.

2.3 Methods

2.3.1 Mechanical properties

Flexural and tensile strength assessments were conducted in accordance with ASTM D790 and ASTM D638 standards, respectively. An Instron testing machine (Model 8112, USA) was employed for these tests, with crosshead speeds set at 1 mm/min for flexural and 2 mm/min for tensile measurements. The Izod impact strength was evaluated at ambient temperature using a Santam pendulum impact tester (Model SIT-20D). Test specimens measured 62.5 mm × 13 mm × 3 mm and were notched to a depth of 2.5 ± 0.02 mm at a 45° angle, consistent with ASTM D256 guidelines. The results presented reflect the average values derived from four specimens per group.

2.3.2 Physical properties

Water absorption and thickness swelling of the composites were determined using ASTM D7031 procedures. Three specimens per composition were dried in an oven at 103 ± 2 °C for 24 hours. Their initial weights and thicknesses were measured with an accuracy of 0.001 g and 0.001 mm, respectively. The samples were immersed in distilled water at room temperature for 24 hours, then surface moisture was gently removed using paper towels, and post-immersion measurements were taken.

2.3.3 Statistical analysis

A one-factor analysis of variance (ANOVA) was used to evaluate the effects of different MWCNT concentrations. Duncan's multiple range test (DMRT) was employed at a 95% confidence level to distinguish significant differences among treatment means when ANOVA revealed statistical significance.

2.3.4 Scanning electron microscopy (SEM) characterization

Composite morphology was examined using field emission scanning electron microscopy (FE-SEM, TESCAN MIRA3 XMU, Czech Republic). A gold layer of approximately 25 nm was sputter-coated on the samples to mitigate charging during imaging. The specimens were analyzed under an accelerating voltage of 5 kV to investigate fracture surfaces and filler dispersion characteristics.

3 Results and discussion

The statistical analysis using ANOVA demonstrated significant effects of MWCNT incorporation on key mechanical and physical properties of the composites. The F-values for water absorption, thickness swelling, impact strength, flexural and tensile strength, and moduli are summarized in Table 2, indicating the degree of influence exerted by the nanofillers.

Table 2. F-value (in analysis of variance) obtained from statistical analysis

Investigated property	F-value
Water absorption (24 h)	7.147
Thickness swell (24 h)	3.578
Impact strength	3.143
Flexural strength	31.264
Flexural modulus	22.113
Tensile strength	803.185
Tensile modulus	728.611

3.1 Flexural and tensile strength

The mechanical enhancement of composites is influenced by multiple factors including fiber type, orientation, interfacial adhesion, and modulus of each component (Hull and Clyne, 1996). CNTs possess a Young's modulus around 1 TPa (Salvetat et al., 1999), and their integration into wood composites significantly boosts stiffness and tensile strength (Ma et al., 2010). Replacing wood fibers (5000-8000 MPa modulus) with CNTs can substantially improve elastic performance (Farsi and Sani, 2014). According to Hazarika and Maji (2014), CNTs interact chemically with hydroxyl and methylol groups in lignocellulosic components, resulting in improved composite strength and durability.

Figures 1 and 2 show the flexural and tensile properties as a function of MWCNT content. Maximum flexural strength and modulus were observed in specimens with 3 phr MWCNTs. In contrast, optimal tensile strength and modulus occurred at 2 phr. Both flexural and tensile strengths declined at 5 phr, likely due to nanoparticle agglomeration leading to poor dispersion, crack initiation, and stress concentration.

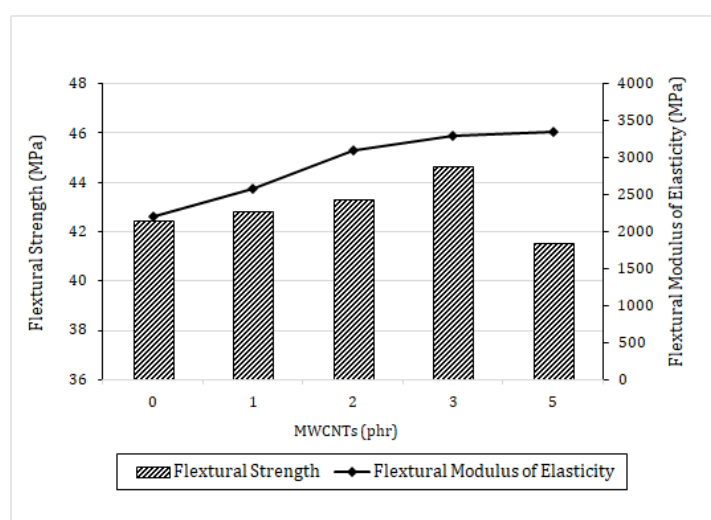


Figure 1. Flexural strength and modulus of PP/reed flour nanocomposites as a function of MWCNTs content

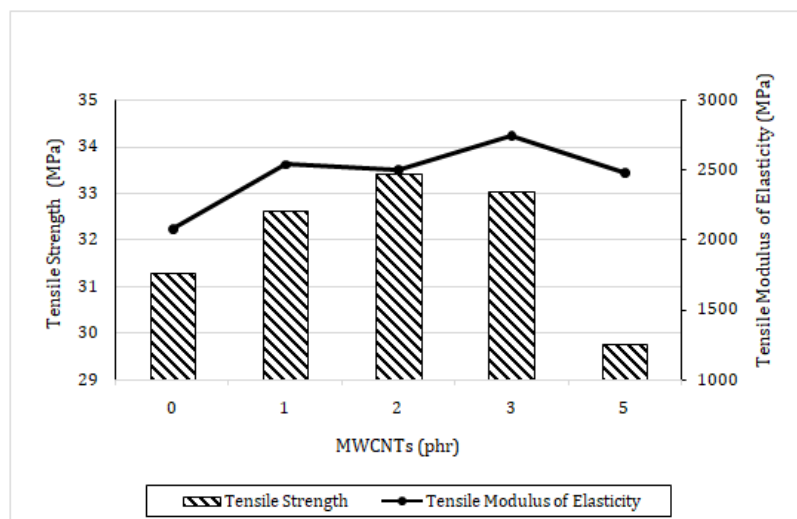


Figure 2. Tensile strength and modulus of PP/reed flour nanocomposites as a function of MWCNTs content

The results indicate that the introduction of MWCNTs increased both flexural and tensile strength. An increase in mechanical properties reveals that the stress was successfully transferred from the PP matrix to the nanostructures reinforced nanocomposite. The nanocomposites incorporating 3 phr MWCNTs exhibited the highest flexural strength and modulus of elasticity. Statistical analysis showed that the mechanical properties in terms of flexural strength and modulus were significantly influenced by the addition of MWCNTs. These results are in compliance with other researches in which greater flexural strength was achieved by applying carbon nanotubes in the PP composites (Li et al., 2007; Musso et al., 2009; Kordkheili et al., 2012). The results also verified that MWCNTs increases the tensile strength of nanocomposites but the optimum values of tensile strength and modulus correspond to the 2 phr MWCNTs specimens. However, increasing MWCNTs nanostructure adversely affects the tensile strength and elasticity modulus.

On the other hand, the addition of 5 phr MWCNTs decreased both flexural and tensile strength of nanocomposites by 7% and 10%, adversely affecting the flexural and tensile modulus of elasticity. This might be related to the ineffective dispersion of MWCNTs and nanostructure agglomerates, leading to the initiation of cracks at stress concentration points and, consequently, a decline in tensile strength.

3.2 Impact resistance

It was found that the impact strength shows the strength of the material against breakage and initiation of crack formation at the weakest regions through the microstructure of the composite, which is the connecting point between lignocellulosic material and polymer matrix (Farsi and Sani, 2014). Figure 3 shows the values of notched impact strength of the studied nanocomposites.

Impact strength, which represents resistance to fracture under sudden loading, is highly dependent on the interfacial zones within the composite microstructure. As shown in Figure 3, the inclusion of 2 phr MWCNTs enhanced impact strength by ~10%, acting as crack arresters through a bridging mechanism (Makar et al., 2005; Tavasoli Farsheh et al., 2011). However, beyond this concentration, impact resistance dropped, likely due to MWCNT clustering, which weakened the matrix's ability to transfer stress effectively (Eitan et al., 2003).

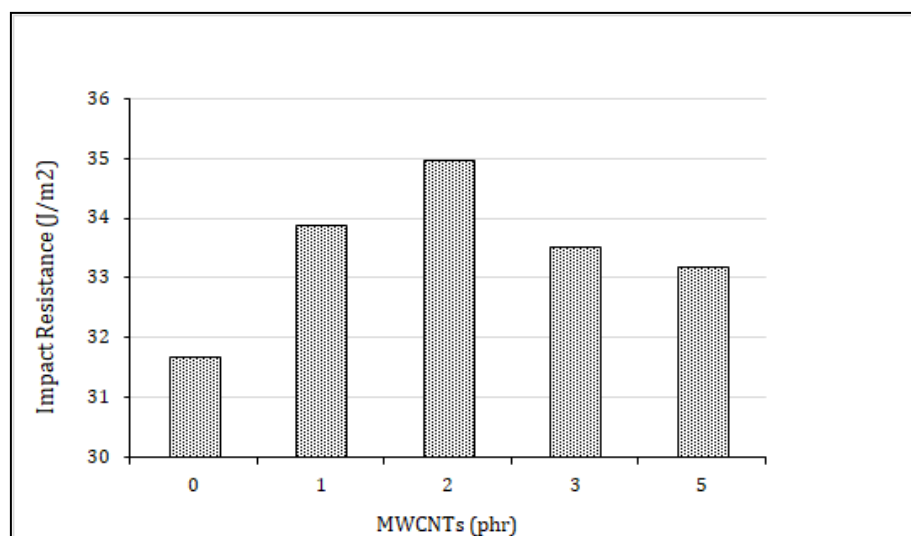


Figure 3. Impact resistance of PP/reed flour nanocomposites as a function of MWCNTs content

3.3 Water absorption and thickness swelling

Natural fibers absorb moisture due to their high hydroxyl group content, resulting in dimensional instability. Water may also permeate through capillary pathways formed at weak fiber-polymer interfaces (Espert et al., 2004). As shown in Figure 4, samples with 1 and 2 phr MWCNTs exhibited higher water absorption, while the lowest was found in 5 phr composites. Thickness swelling followed a similar trend. These findings align with prior studies highlighting the role of nanoparticle concentration on hydrophobic behavior (Abdelmouleh et al., 2007; Dhakal et al., 2007; Shinoj et al., 2010). The influence of MWCNTs addition on the water absorption after 24 h water immersion and the thickness swell of PP/RF nanocomposites are shown in Figure 4.

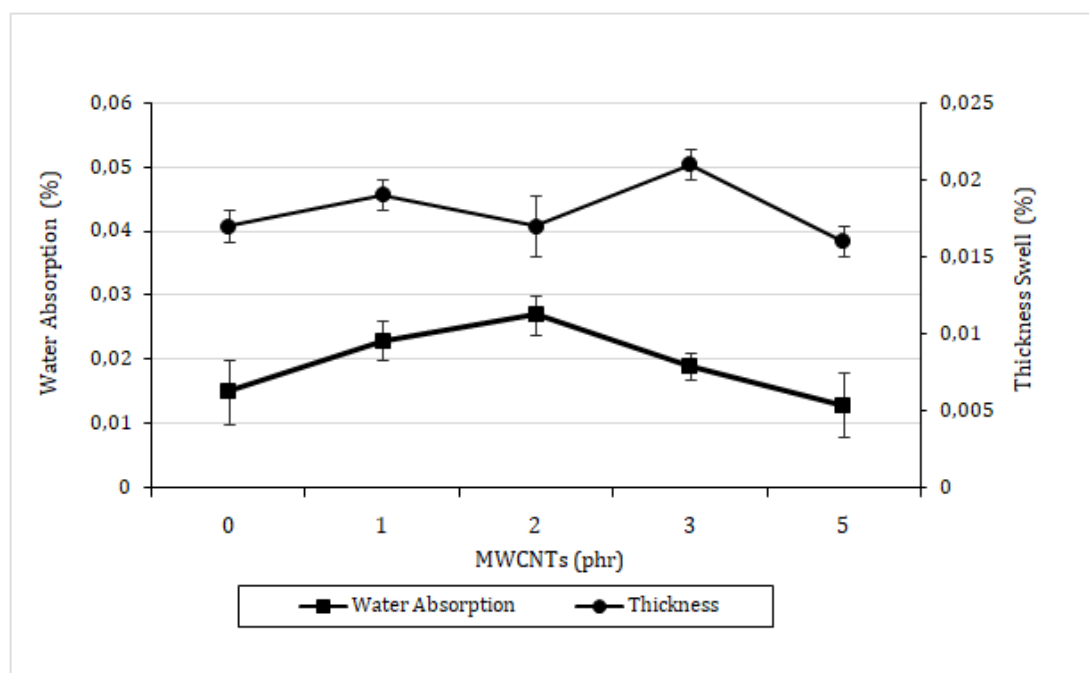


Figure 4. Water absorption and thickness swell percentage (24 hour) of PP/reed flour nanocomposites as a function of MWCNTs content

The highest water absorption values were observed in 1 and 2 phr MWCNTs incorporated composites, whereas the lowest one was found in the nanocomposites containing the highest amount of MWCNTs (5 phr). The lowest thickness swell was obtained from the experiment performed on the 5 phr MWCNTs nanocomposites.

3.4 Morphology of hybrid nanocomposites

SEM analysis (Figure 5) illustrated improved filler-matrix interaction upon MWCNT addition, with crack bridging mechanisms evident. Increased MWCNT levels, however, led to visible agglomerates, particularly at 5 phr, which created stress concentration zones prone to failure (Seshadri and Saigal, 2007).

Figure 5 shows FE-SEM micrographs showing the fracture surfaces of PP/reed flour nanocomposites containing MWCNTs at 1, 2, 3, and 5 phr.

Introducing MWCNTs to the PP/reed flour composite improved the interface between the fibers and matrix. Moreover, CNT nanostructures can act as barriers in the matrix against the cracks opening during their growth, through a crack bridging mechanism illustrated in Figure 6.

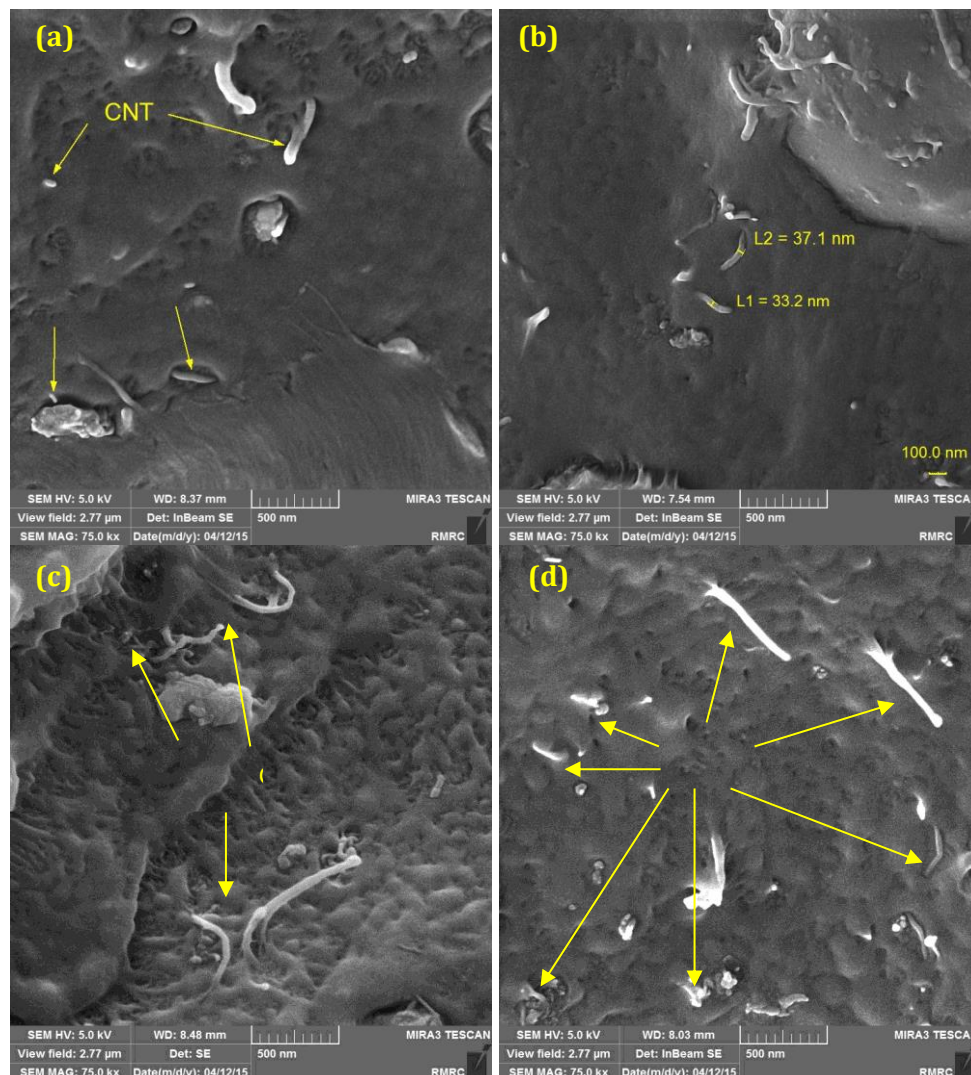


Figure 5. FE-SEM micrographs of PP/RF/MWCNT nanocomposites microstructure: a) 1 phr MWCNTs, b) 2 phr MWCNTs, c) 3 phr MWCNTs, d) 5 phr MWCNTs

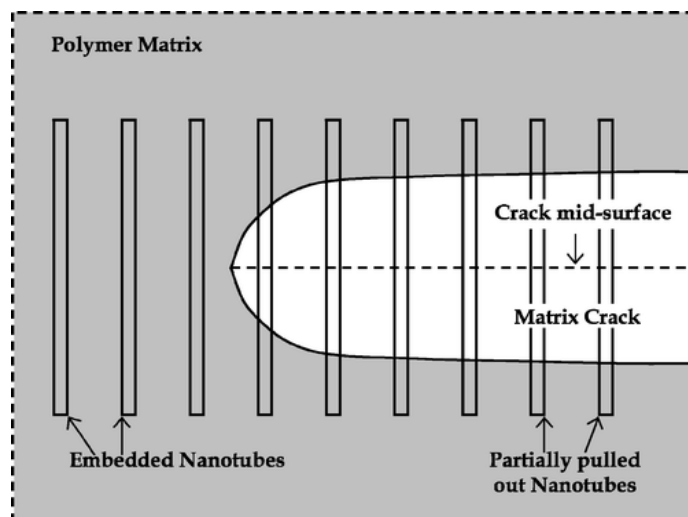


Figure 6. Schematic of crack bridging mechanism by CNTs, Reprinted from Ref. (Seshadri and Saigal, 2007)

As a result of such phenomena, a higher level of energy is needed for the crack to grow and propagate (Seshadri and Saigal, 2007). The crack bridging process is idealized as normal MWCNTs pull out from the polymer matrix, which is shown in the fracture surface of nanocomposites with all amounts of MWCNTs.

It can also be observed that some regions of the agglomerated nanoparticles can be identified from the SEM images as the MWCNTs content was increased from 3 to 5 phr, (Figures 5 (c) and (d)). The decline in the flexural and tensile strength and the impact strength value for nanocomposites incorporating MWCNTs more than 3 phr might be related to the increase in probability for nanostructures agglomeration that creates regions of stress concentrations requiring less energy to elongate the crack propagation.

4 Conclusions

- This study investigated the influence of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the physical and mechanical properties of polypropylene/reed flour (PP/RF) nanocomposites. The results confirmed that the incorporation of MWCNTs up to 3 phr significantly enhanced the mechanical properties, particularly flexural and tensile strength. Notably, 3 phr MWCNTs led to the highest flexural performance, whereas tensile properties peaked at 2 phr.
- Despite the mechanical benefits, increasing MWCNT concentration to 5 phr resulted in performance deterioration due to nanoparticle agglomeration and poor dispersion. Furthermore, 2 phr MWCNTs exhibited optimal impact strength, while the lowest water absorption and thickness swelling occurred in the 5 phr formulation, indicating improved hydrophobicity at higher MWCNT content.
- Overall, the findings suggest that the addition of MWCNTs, particularly at 2-3 phr, is effective in reinforcing PP/reed flour composites, optimizing their structural and moisture resistance characteristics for potential industrial applications.

Acknowledgments

The authors wish to thank for the support of the Department of Wood Science and Paper Technology, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran.

Author Contributions

Seyyed Khalil HosseiniHashemi: Creating the research idea, writing the article, performing the statistical operations, and interpretation of data **Maryam Jamshidi:** Conducting the laboratory work, taking the measurement data, **Behzad Kord:** Collaboration in research idea and analysis of data, **Eshmaiel Ganjian:** writing and improving the article, **Ahmad Ehsani:** writing the article and drawing the graphs, **Nadir Ayrlimis:** writing and improving the article.

Funding statement

No financial support was received for the study.

Conflict of interest

We confirm that there is no conflict of interest.

References

- Abdelmouleh, M., Boufis, S., Belgacem, M.N., and Dufresne, A., (2007). Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibre loading, *Composites Science and Technology*, 67(7-8), 1627-1639. DOI: [10.1016/j.compscitech.2006.07.003](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.07.003)
- Bal, B.C., (2023). Comparative study of some properties of wood plastic composite materials produced with polyethylene, wood flour, and glass flour, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 6(1), 70-79, DOI: [10.33725/mamad.1301384](https://doi.org/10.33725/mamad.1301384)
- Cataldo, F., Ursini, O., and Angelini, G., (2009). MWCNTs elastomer nanocomposite, Part 1: The addition of MWCNTs to a natural rubber-based carbon black-filled rubber compound, *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 17, 38-54, DOI: [10.1080/15363830802515907](https://doi.org/10.1080/15363830802515907)
- Coleman, J.N., Khan, U., and Gun'Ko, Y.K., (2006). Mechanical reinforcement of polymers using carbon nanotubes, *Advanced Materials*, 18(6), 689-706, DOI: [10.1002/adma.200501851](https://doi.org/10.1002/adma.200501851)
- Dhakal, H.N., Zhang, Z.Y., and Richardson, M.W., (2007). Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fiber reinforced unsaturated polyester composites, *Composites Science and Technology*, 67(7-8), 1674-1683. DOI: [10.1016/j.compscitech.2006.06.019](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.019)
- Eitan, A., Jiang, K., Dukes, D., Andrews, R., and Schadler, L.S., (2003). Surface modification of multi-walled carbon nanotubes: towards the tailoring of the interface in polymer composites, *Chemistry of Materials*, 15(16), 3198-3201, DOI: [10.1021/cm020975d](https://doi.org/10.1021/cm020975d)
- Espert, A., Vilaplana, F., and Karlsson, S., (2004). Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(11), 1267-1276, DOI: [10.1016/j.compositesa.2004.04.004](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.04.004)
- Farsi, M., and Sani, F., (2014). Effects of multi-walled carbon nanotubes on the physical and mechanical properties of high-density polyethylene/wood flour nanocomposites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27(8), 1139-1154, DOI: [10.1177/0892705713515899](https://doi.org/10.1177/0892705713515899)
- Giraldo, L.F., Brostow, W., Davaux, E., López, B.L., and Pérez, L.D., (2008). Scratch and wear resistance of polyamide 6 reinforced with multiwall carbon nanotubes, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 8(6), 3176-3183, DOI: [10.1166/jnn.2008.092](https://doi.org/10.1166/jnn.2008.092)

- Hazarika, A., and Maji, T.K., (2014). Strain sensing behavior and dynamic mechanical properties of carbon nanotubes/nanoclay reinforced wood polymer nanocomposites, *Chemical Engineering Journal*, 247, 33-41, DOI: [10.1016/j.cej.2014.02.069](https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.02.069)
- Hollertz, R., Catterjee, S., Gutmann, H., Geiger, T., Nüesch, F.A., and Chu, B.T.T., (2011). Improvement of toughness and electrical properties of epoxy composites with carbon nanotubes prepared by industrially relevant processes, *Nanotechnology*, 22(12), 125702-125711, DOI: [10.1088/0957-4484/22/12/125702](https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/12/125702)
- HosseiniHashemi, S.K., Badritala, A., and Akhtari, M., (2025). Improving durability and mechanical resistance of wood/plastic composites through boric acid treatment, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 8(1), 172-187, DOI: [10.33725/mamad.1710675](https://doi.org/10.33725/mamad.1710675)
- Hosseinihashemi, S.K., and Arwinfar, F., (2023). Effect of fungal infection on physico-mechanical resistance of WPC made from thermally treated wood/PP, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 6(1), 90-103, DOI: [10.33725/mamad.1300208](https://doi.org/10.33725/mamad.1300208)
- Huang, H., Liu, C.H., Wu, Y., and Fan, S., (2005). Aligned carbon nanotube composite films for thermal management, *Advanced Materials*, 17(13), 1652-1656, DOI: [10.1002/adma.200500467](https://doi.org/10.1002/adma.200500467)
- Hull, D., and Clyne, T.W., (1996). *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, DOI: [10.1017/CBO9781139170130](https://doi.org/10.1017/CBO9781139170130)
- Jian, B., Mohrmann, S., Li, H., Li, Y., Ashraf, M., Zhou, J., and Zheng, X., (2022). A review on flexural properties of wood-plastic composites, *Polymers*, 14(19), 3942, DOI: [10.3390/polym14193942](https://doi.org/10.3390/polym14193942)
- Jin, S., and Matuana, L.M., (2010). Wood/plastic composites co-extruded with multi-walled carbon nanotube-filled rigid poly(vinyl chloride) cap layer, *Polymer International*, 59(5), 648-657, DOI: [10.1002/pi.2745](https://doi.org/10.1002/pi.2745)
- Kim, B.J., (2012). The effect of inorganic fillers on the properties of wood plastic composites, PhD Dissertation, Louisiana State University, DOI: [10.31390/gradschool dissertations.2399](https://doi.org/10.31390/gradschool dissertations.2399)
- Kim, J.K., and Mai, Y.W., (1998). *Engineering Interfaces in Fiber-Reinforced Composite*, Elsevier, Oxford.
- Kingston, C., Zepp, R., Andrady, A., Boverhof, D., Fehir, R., Hawkins, D., Roberts, J., Sayre, P., Shelton, B., Sultan, Y., and Vejins, V., (2014). Release characteristics of selected carbon nanotube polymer composites, *Carbon*, 68, 33-57, DOI: [10.1016/j.carbon.2013.11.042](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.11.042)
- Klyosov, A.A., (2004). *Wood-plastic Composites*, Wiley, Hoboken. DOI: [10.1002/9780470165935](https://doi.org/10.1002/9780470165935)
- Kord, B., Jamshidi, M., and Hosseinihashemi, S.K., (2017). Effect of multi-walled carbon nanotubes on viscoelastic properties of PP/reed flour composites, *Journal of Polymers and the Environment*, 25, 1313-1320, DOI: [10.1007/s10924-016-0909-x](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0909-x)
- Kordkheili, H.Y., Hiziroglu, S., and Farsi, M., (2012). Some of the physical and mechanical properties of cement composites manufactured from carbon nanotubes and bagasse fiber, *Materials & Design*, 33, 395-398, DOI: [10.1016/j.matdes.2011.04.027](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.027)

- Li, G.Y., Wang, P.M., and Zhao, X., (2007). Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites, *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 377-382, DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2006.12.011](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.011)
- Lu, J.Z., Wu, Q., and McNabb, H.S., (2000). Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: a review of coupling agents and treatments, *Wood and Fiber Science*, 32, 88-104.
- Łukawski, D., Hochmańska-Kaniewska, P., Janiszewska-Latterini, D., and Lekawa-Raus A., (2023). Functional materials based on wood, carbon nanotubes, and graphene: manufacturing, applications, and green perspectives, *Wood Science and Technology*, 57, 989-1037, DOI: [10.1007/s00226-023-01484-4](https://doi.org/10.1007/s00226-023-01484-4)
- Ma, P.C., Mo, S.Y., Tang, B.Z., and Kim, J.K., (2010). Dispersion, interfacial interaction and re-agglomeration of functionalized carbon nanotubes in epoxy composites, *Carbon*, 48(6), 1824-1834, DOI: [10.1016/j.carbon.2010.01.028](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.028)
- Makar, J., Margeson, J., and Luh, J., (2005). Carbon nanotube/cement composites-early results and potential applications, *Paper presented at the proceeding of the 3rd international conference on construction materials: performance, innovations and structural implications*, Vancouver, Canada.
- Mohanty, A.K., Misra, M., and Drzal, L.T., (2001). Surface modification of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview, *Composite Interfaces*, 8(5), 313-343, DOI: [10.1163/156855401753255422](https://doi.org/10.1163/156855401753255422)
- Musso, S., Tulliani, J.M., Ferro, G., and Tagliaferro, A., (2009). Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites, *Composites Science and Technology*, 69(11-12), 1985-1990, DOI: [10.1016/j.compscitech.2009.05.002](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.05.002)
- Park, M., Jang, J.U., Park, J.H., Yu, J., and Kim, S.Y., (2020). Enhanced tensile properties of multi-walled carbon nanotubes filled polyamide 6 composites based on interface modification and reactive extrusion, *Polymers*, 12(5), 997, DOI: [10.3390/polym12050997](https://doi.org/10.3390/polym12050997)
- Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M., and Komppa, V., (2007). *Komposiittirakenteet*, Muoviyhdistys ry, Hakapaino Oy, Helsinki.
- Salvetat, J.P., Kulik, A.J., Bonard, J.M., Briggs, G.A.D., Stockli, T., Metenier, K., Bonnamy, S., Beguin, F., Burnham, N.A., and Forro, L., (1999). Elastic modulus of ordered and disordered multiwalled carbon nanotubes, *Advanced Materials*, 11(2), 161-165, DOI: [10.1002/\(SICI\)1521-4095\(199902\)11:2%3C161::AID-ADMA161%3E3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(199902)11:2%3C161::AID-ADMA161%3E3.0.CO;2-J)
- Selke, S.E., and Wichman, I., (2004). Wood fiber/polyolefin composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(3), 321-326. DOI: [10.1016/j.compositesa.2003.09.010](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.010)
- Seshadri, M., and Saigal, S., (2007). Crack bridging in polymer nanocomposites, *Journal of Engineering Mechanics*, 133(8), 911-918, DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:8\(911\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:8(911))
- Shinoj, S., Panigrahi, S., and Visvanathan, R., (2010). Water absorption pattern and dimensional stability of oil palm fiber-linear low density polyethylene composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 117(2), 1064-1075, DOI: [10.1002/app.31765](https://doi.org/10.1002/app.31765)
- Siró, I., and Plackett, D., (2010). Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review, *Cellulose*, 17(3), 459-494, DOI: [10.1007/s10570-010-9405-y](https://doi.org/10.1007/s10570-010-9405-y)

- Sun, L.Y., Gibson, R.F., Gordaninejad, F., and Suhr, J., (2009). Energy absorption capability of nanocomposites: A review, *Composites Science and Technology*, 69(14), 2392-2409, DOI: [10.1016/j.compscitech.2009.06.020](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.06.020)
- Tavasoli Farsheh, A., Talaeipour, M., Hemmasi, A.H., Khademieslam, H., and Ghasemi, I. (2011). Investigation on the mechanical and morphological properties of foamed nanocomposites based on wood flour/PVC/multi-walled carbon nanotubes, *BioResources*, 6(1), 841-852, DOI: [10.15376/biores.6.1.841-852](https://doi.org/10.15376/biores.6.1.841-852)
- Vuorinen, J., (2007). *Komposiitit [Composites]*, Muovialan perustietoutta, Muovi- ja elastomeeritekniikan kesäseminaari, Vammala.
- Zhao, Z., Zhang, Z., Wang, H., Li, C., Le, L., and Liu, M., (2025). Functional wood-plastic composites: A review of research progress on flame retardancy, weather resistance and antimicrobial properties, *Industrial Crops and Products*, 223, 120196, DOI: [10.1016/j.indcrop.2024.120196](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120196)



Furniture reuse: Institutional models in Turkey and Europe

Gizem Büke Öztürk^{1*} 

ABSTRACT: This study provides a comparative examination of repurposing strategies developed within the furniture sector in line with sustainability and circular economy principles, with a focus on the contexts of Europe and Turkey. The aim is to investigate institutional models for reusing furniture with potential for extended life cycles, analyze the recovery capacity of wood-based materials, and propose a sustainable and applicable framework for Turkey. A qualitative research approach was adopted, in which the activities of European organizations such as RREUSE, WRAP, Repair Café, ENVIE, RepaNet, and AERESS were evaluated through a literature review and document-based analysis. In parallel, official reports and case studies from metropolitan municipalities including Istanbul, Kocaeli, and Izmir were analyzed. In the material assessment, solid wood, MDF, and particleboard were classified according to criteria such as technical suitability, structural durability, and potential for surface renewal. The findings indicate that multi-actor, socially driven models are prevalent in Europe, while in Turkey, initiatives remain limited and largely charity-oriented. The study concludes by proposing a new model based on collaboration with local governments, offering a roadmap for strengthening Turkey's institutional capacity in sustainable furniture repurposing.

Keywords: Reuse in furniture, Sustainability, Material recovery

Mobilyaların yeniden kullanımı: Türkiye ve Avrupa'da kurumsal modeller

ÖZ: Bu çalışma, mobilya sektöründe sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi ilkeleri çerçevesinde geliştirilen yeniden işlevlendirme stratejilerini, Avrupa ve Türkiye örnekleri üzerinden karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Çalışmanın amacı, yeniden kullanım potansiyeli taşıyan mobilyalara ilişkin kurumsal modelleri değerlendirmek, ahşap bazlı malzemelerin geri kazanım kapasitesini analiz etmek ve Türkiye için sürdürülebilir ve uygulanabilir bir kurumsal çerçeve önermektir. Nitel bir araştırma yaklaşımı benimsenmiş; Avrupa'da RREUSE, WRAP, Repair Café, ENVIE, RepaNet ve AERESS gibi kurumların faaliyetleri literatür taraması ve belge temelli analiz yoluyla incelenmiştir. Buna paralel olarak, Türkiye'de İstanbul, Kocaeli ve İzmir gibi büyükşehir belediyelerinin resmi raporları ve örnek uygulamaları değerlendirilmiştir. Malzeme incelemesinde masif ahşap, MDF ve yonga levha türleri; teknik uygunluk, yapısal dayanım ve yüzey yenilenebilirliği ölçütlerine göre sınıflandırılmıştır. Bulgular, Avrupa'da sosyal girişim temelli ve çok aktörlü modellerin yaygın olduğunu; Türkiye'de ise girişimlerin sınırlı kaldığını ve ağırlıklı olarak yardım odaklı işlediğini ortaya koymaktadır. Çalışma, yerel yönetimlerle iş birliğine dayalı yeni bir model önererek Türkiye'nin kurumsal kapasitesini geliştirmeye yönelik bir yol haritası sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Mobilyada yeniden işlev, Sürdürülebilirlik, Malzeme geri kazanımı

1 Introduction

Sustainability and circular economy principles have gained increasing prominence in the furniture industry. Within this framework, the concept of *adaptive reuse*-here applied to furniture repurposing-has emerged as a key strategy for extending product life cycles, reducing waste generation, and minimizing material loss (Bullen and Love, 2011; Chapman, 2005). In the context of furniture, adaptive reuse refers to repurposing products beyond their original function, contributing not only to environmental objectives but also to economic and cultural sustainability (Conejos et al., 2013). The reuse of furniture with aesthetic or emotional value, in particular, has been shown to influence consumer behavior and strengthen sustainable consumption patterns (Güneş and Demirarslan, 2020).

In contemporary furniture design, adaptive reuse has gained visibility both as a creative trend and as a sustainable production strategy (Yalçınkaya and Karadeniz, 2022). Approaches such as *superuse*, *upcycling*, *vintage design*, and *repair culture* aim to restore the functional and aesthetic qualities of discarded or outdated furniture (Superuse, n.d.; Reclaim, 2024). These practices enable furniture to be reimagined in new contexts through creative transformation. Among various materials, wood is the most commonly reused due to its physical durability, aesthetic appeal, repairability, and biodegradability (Efe and Kasal, 2007). Solid wood, especially when processed with traditional techniques, offers high reuse potential, while engineered products such as MDF and particleboard demonstrate more limited durability because of their susceptibility to moisture and impact (Köksal and Kelleci, 2020).

In Europe, institutional frameworks for furniture reuse are relatively well established. Organizations such as RREUSE, WRAP UK, the Remade Network, and the Repair Café Foundation combine environmental and social objectives by managing collection, repair, and redistribution processes (RREUSE, 2025; Repair Café Foundation, 2025). These initiatives promote not only ecological waste management but also social inclusion, local employment, and community engagement. The European Union has also implemented regulatory measures designed to increase reuse rates and strengthen circular economy infrastructures (European Commission, 2017).

By contrast, efforts in Turkey remain fragmented and are primarily led by municipalities and small-scale volunteer initiatives. Notable examples include the donation center of Istanbul Metropolitan Municipality, the URBANREC project by Bornova Municipality, and the activities of GEKADER. However, at the national level, significant gaps persist in systematic data sharing, organizational capacity, and policy development (Candan et al., 2024).

Against this background, the aim of this study is to comparatively examine institutional approaches to furniture reuse in Europe and Turkey, assess the technical characteristics and reuse potential of wood-based materials, and propose an applicable organizational framework that can strengthen Turkey's institutional capacity in sustainable furniture repurposing. To achieve this aim, the study adopts a qualitative research method supported by literature reviews, municipal reports, document-based analysis, and case studies.

2 Material and Method

2.1 Research Gap and Rationale

Due to their bulky structure and material diversity, furniture waste represents a strategic category with both economic and environmental implications. In Turkey, reuse and upcycling practices related to this category remain limited in terms of institutionalization and legal

framework development. This gap highlights the need for systematic research and provides the underlying rationale for the present study, which examines the role of local governments and develops policy-oriented recommendations for strengthening furniture reuse systems.

2.2 Research methodology

The study adopts a qualitative research design grounded in document analysis and comparative content analysis. Within a descriptive-analytical framework, the 2024 activity reports of metropolitan and district municipalities in Turkey were examined. European best practices were evaluated through sustainable development policies, circular economy strategies, and social enterprise models. A multiple-case study approach enabled an analytical comparison of various implementation models across both Turkey and Europe.

2.3 Data collection process and tools

Data were collected from two main sources. Primary data consisted of 2024 activity reports published by major metropolitan municipalities such as Istanbul, Kocaeli, and İzmir, as well as district municipalities including Gebze, Kartepe, and Körfez. Secondary data comprised academic literature (e.g., Bovea and Pérez-Belis, 2012), European Commission documents, non-governmental organization (NGO) reports (e.g., WRAP, RREUSE, ENVIE), and sustainable development strategy papers. All documents were analyzed using open coding, and the resulting themes were categorized under institutionalization, community participation, education, legal framework, and policy support. Coding was conducted manually, and the analysis was carried out directly by the researcher.

2.4 Data analysis method

Comparative thematic analysis was employed to evaluate local government practices in Turkey alongside best practices in Europe, categorized under six sustainability-oriented dimensions: institutional structure, community engagement, material separation capacity, educational activities, policy support, and monitoring and reporting mechanisms. Findings were presented with the support of tables and figures, emphasizing measurable indicators such as recovery rates, partnerships, participation levels, and implementation scope. This method ensures cross-scale comparability and enabled a structural analysis of multi-actor models.

2.5 Research gap, contribution, and limitations

The existing literature on institutional-level analysis of furniture upcycling in Turkey remains limited and lacks comparative depth. Previous studies often focus on individual or small-scale social initiatives, with insufficient attention to municipal capacities, regulatory compliance, and integration with community-based models. This study addresses these gaps by comparing Turkish practices with established European models and offering new policy insights. Its primary contribution lies in proposing an integrated multi-actor evaluation framework for sustainable furniture waste management. However, the main limitation is the exclusive reliance on publicly available documents, without the inclusion of field observations. This constraint positions the study as a preliminary evaluation, which can serve as a foundation for future qualitative and quantitative field research.

3 Findings and Discussion

3.1 Repurposing and recycling strategies as a sustainability approach in furniture

Furniture repurposing refers to the reuse of existing components for functions other than their original purpose, while preserving material integrity. It goes beyond simple repair; it reflects a multidisciplinary approach that integrates creative design processes, cultural continuity, and environmental responsibility (Güneş and Demirarslan, 2020; Elibol et al., 2018; Şenkal, 2023). For example, using a tabletop as a shelf or a wardrobe door as a desk introduces creative solutions that foster emotional connections with the past, adding both functional and symbolic value (Demirbaş, 2017). This approach recirculates products, thereby reducing waste generation, and contributes to environmental sustainability by lowering carbon emissions and energy consumption (Pei et al., 2024; Kutlu and Bekar, 2021). For instance, reusing a one-ton sofa can prevent up to 1.45 tons of CO₂-equivalent emissions (RREUSE, 2023). Consequently, it conserves resources by reducing raw material consumption, diversifies design processes, and creates job opportunities for local artisans and producers (Kershaw, 2020; Yağan Köylü, 2023).

According to the Brundtland Report (WCED, 1987), sustainability is defined as “meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.” In this context, prolonging product life cycles, preventing waste, and reducing environmental impacts are key objectives (Manzini and Vezzoli, 2003). The "Cradle to Cradle" model by McDonough and Braungart advocates for product regeneration in a waste-free cycle compatible with nature (McDonough and Braungart, 2002). In line with such sustainability principles, repurposing emerges as a prominent strategy. It enables products to be utilized in new forms without resorting to energy-intensive production or incurring recycling costs (Ellen MacArthur Foundation, 2019), thereby making sustainability tangible not only environmentally but also economically and socially (Vezzoli and Manzini, 2008; Stahel, 2016). Economically, it offers low-cost options for consumers and value-added design opportunities for producers. While high-quality materials such as solid wood are easy to process, composites like MDF can be reused through surface renewal or modular assembly (European Commission, 2017; Köksal and Kelleci, 2020).

In recent years, design trends such as “vintage” and “retro” have gained popularity in supporting this perspective (Yararel Doğan et al., 2022). These trends prioritize the restoration and reuse of solid wood furniture from the 1950s–1980s (Güneş and Demirarslan, 2020). Furniture markets for such items are increasingly attracting interest across both Europe and Turkey. The “upcycling” approach, meanwhile, involves transforming obsolete materials into higher-value products (Sung, 2017). For example, discarded wooden pallets can be creatively upcycled into functional and aesthetically valuable furniture. Such practices not only reduce material waste but also promote community engagement through do-it-yourself (DIY) initiatives, highlighting the social, environmental, and economic dimensions of sustainable furniture design (Figure 1).

Another notable perspective is the “repair culture,” which emphasizes product repair before waste occurs. Events such as Repair Cafés provide free furniture repairs, support craftsmanship, and encourage social interaction (Repair Café Foundation, 2025). Modular and disassemblable furniture designs further reinforce this mindset by allowing components to be reused in various combinations, enhancing production flexibility and extending product lifespans (Özel and Kayacan, 2020). Lastly, open-source and DIY (do-it-yourself) furniture designs are integral to this transformation movement. Designs downloaded from platforms

such as OpenDesk can be locally manufactured, involve users directly in the process, and help disseminate the culture of reuse (OpenDesk, 2020).



Figure 1. Up cycled pallet furniture, illustrating DIY practices and reuse strategies within sustainable furniture design (Schmitz, 2015).

Furniture repurposing is significant not only for sustainability but also for aesthetics, personalization, and cultural continuity. Users increasingly prefer products with a story and character, thereby strengthening the influence of circular and ethical design in the sector.

3.2 The reusability potential of wood materials

Wood, with its natural, renewable, and biodegradable properties, is among the most suitable materials for sustainable design and circular economy principles. Sustainability in this context aims to reduce resource consumption across the product lifecycle, minimize environmental impacts, and ensure the reintegration of materials into circulation. Accordingly, the reuse potential of wood holds critical importance in sustainable product management (Oğurlu, 2024). Different wood types used in furniture production offer varying levels of recovery potential depending on their physical properties and workability. Solid wood species (e.g., oak, walnut, beech, spruce) are particularly well suited for secondary use due to their robust structures and adaptability to surface refinishing processes (As and Büyüksarı, 2010). Reuse practices involving such materials reduce carbon emissions, decrease demand for raw materials, and contribute to the preservation of natural ecosystems (Oğurlu, 2024).

While softwoods (spruce, pine) are easy to work with, they are prone to surface deformations. Tropical hardwoods (teak, mahogany) are highly durable but limited by high cost, restricted availability, and the need for sustainable forestry certification (Dilik and Gürsoy, 2017). On the other hand, low-density raw woods sourced from industrial by-products such as pallets and crates are frequently utilized in upcycling projects (Canbakal Ataoğlu, 2015). Composite materials such as MDF and particleboard, however, provide limited recyclability due to their low durability and formaldehyde-based content (CPWR, 2004). These materials are typically suitable for restricted applications, such as surface cladding or mosaic panels. In addition to wooden type, surface treatments and joining techniques play a decisive role in the recyclability of wooden furniture. Synthetic coatings

(e.g., varnish, lacquer, polyurethane) complicate sanding and refinishing, whereas natural oils, waxes, and shellac are more environmentally friendly and easier to renew (Vidholdová et al., 2021). Open-pore species such as oak, chestnut are particularly compatible with such treatments. Similarly, demountable joints- such as mortise and tenon, dowels, or wooden blocks- facilitate the disassembly and reuse without structural damage, whereas glued or nailed joints hinder disassembly and compromise material integrity (Vidholdová et al., 2021).

Solid wood, with its longevity and natural texture, thus offers clear advantages for environmental sustainability. Conversely, composites like MDF and particleboard, while affordable, present significant structural and environmental drawbacks (Değirmençtepe and Çolak, 2021). Beyond material properties, certification systems play a crucial role in sustainable furniture production. This study examines four widely recognized schemes in the sector: FSC, PEFC, Cradle to Cradle, and the EU Ecolabel (FSC, 2024; PEFC, 2024; Cradle to Cradle Certified, 2024; European Commission, 2017). FSC and PEFC certify sustainable forest management practices, while Cradle to Cradle evaluates multidimensional criteria including material health, energy efficiency, water stewardship, and social responsibility. The EU Ecolabel, meanwhile, serve as an official environmental label that covers the entire product lifecycle (Table 1). Other certification systems were excluded from this study due to their limited use in the furniture sector.

Table 1. International environmental labels used in furniture products and their descriptions

Certificate/Label	Logo	Description
FSC (Forest Stewardship Council)		An international certification system that promotes responsible forest management. The FSC label indicates that the wood used in the product originates from sustainably managed sources.
PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification)		A certification program suitable for small forest owners that supports sustainable forest management. The PEFC label signifies that the product meets environmental, economic, and social sustainability criteria.
Cradle to Cradle Certified		A comprehensive certification system that evaluates a product's life cycle based on criteria such as material health, reuse potential, use of renewable energy, water stewardship, and social responsibility.
EU Ecolabel		The official environmental label of the European Union. It aims to reduce the environmental impact of products throughout their entire life cycle. It covers a wide range of product categories, including furniture.

In conclusion, solid wood emerges as the most suitable material for sustainable repurposing due to its durability, reparability, and renewable surface. Achieving sustainability in furniture design requires environmentally friendly production processes, the use of demountable joints, and repair-oriented practices throughout the lifecycle. In this way, wooden materials can become not only reusable but also long-lasting and environmentally responsible. Table 2 presents a comparative analysis of three wood-based materials widely used in the furniture industry-solid wood, MDF, and particleboard. These materials were selected for their prevalence in the sector, and their differences were analyzed in terms of structural properties, surface treatment potential, durability, and joining techniques. Other materials (e.g., plywood, OSB, HDF) were excluded from the scope due to their limited application areas or insufficient data. The selected three materials are therefore considered representative for evaluating sustainability practices in the furniture industry.

Table 2. Comparison of woods used in furniture in terms of sustainability

Material Type	Advantages in Terms of Sustainability	Challenges in Terms of Sustainability	Surface Renewal Suitability	Reusability Performance
Solid Wood	Natural, renewable, long-lasting; easily renewable through sanding, oiling, and polishing; low carbon footprint.	Can be costly; surface deformations may occur under heavy use.	Very High – Suitable for sanding, oiling, polishing, etc.	✓ Very High
MDF (Medium-Density Fiberboard)	Smooth surface, low cost, easy to process; can be restored with surface coatings in some cases.	Sensitive to moisture, contains formaldehyde; may swell and blister.	Moderate – Limited correction possible through surface coatings.	△ Moderate
Particleboard (Chipboard)	Economical, lightweight, readily available.	Poor screw holding capacity, deteriorates with moisture; low structural strength.	Low – Usually requires part replacement rather than surface renewal.	✗ Low

Taken together, these evaluations confirm that solid wood holds the greatest potential for reuse, owing to its physical durability and reparability. To maximize this potential, sustainability-oriented surface treatments and demountable joints should be prioritized in production. When material selection, production techniques, user habits, and repair culture are considered in an integrated manner, the contribution of wooden materials to circular design can be significantly enhanced.

3.3 Institutional practices in Europe: Organizations and system models

In Europe, the recycling and reuse of furniture waste are managed through multi-actor institutional structures aligned with the European Union's circular economy policies. These models aim not only to generate environmental benefits but also to foster social inclusion, local employment, and community-based economic development (European Commission, 2021; Interreg Europe, 2022). One of the most prominent networks in this field is RREUSE, which brings together social enterprises in more than 20 countries. Member organizations contribute to both environmental outcomes and local benefits through activities such as waste collection, repair, redesign, and social retail (RREUSE, 2025; Wikipedia, 2024). RREUSE integrates product reuse with socio-economic outcomes, prioritizing social employment alongside environmental sustainability.

Similarly, the UK-based WRAP (Waste and Resources Action Programme) is a public-interest organization that focuses on long-lasting design, repair protocols, and consumer awareness. WRAP promotes sustainability in the furniture sector through initiatives developed in collaboration with local governments (WRAP, 2021a; 2021b). Another notable initiative is the Repair Café Foundation, a Netherlands-based organization that advances a culture of repair through public workshops where volunteers and participants repair household items together. These workshops encourage knowledge exchange, social interaction, and the shared use of resource (Repair Café Foundation, 2024a; 2024b).

In France, ENVIE operates more than 50 local centers dedicated to the collection and repair of durable consumer products (furniture, electronics, appliances), providing employment opportunities for disadvantaged groups (Fédération Envie, 2022). In Austria, RepaNet functions within the framework of the social economy, combating long-term unemployment through repair workshops and social retail stores that generate both environmental and social value (RepaNet, 2024). In Spain, AERESS unites social economy-

based structures under one umbrella, reducing waste and fostering social inclusion through the collection and repair of furniture and electronic items (AERESS, 2024).

Many organizations affiliated with RREUSE operate similar models. For instance, Emmaüs Défi in France supports circular economy practices by collecting and repairing furniture while promoting the social reintegration of homeless individuals (Emmaüs Défi, 2024). In Belgium, De Kringwinkel refurbishes millions of second-hand furniture and household items annually, reintegrating them into the circular economy and generating substantial employment opportunities (De Kringwinkel, 2024).

In Croatia, Humana Nova, although primarily focused on textiles, also contributes to furniture reuse and social employment (Humana Nova, 2024). Likewise, Germany's Soex Group, while mainly textile-oriented, runs furniture repair and reuse programs in selected branches (Soex Group, 2023).

In addition, local organizations such as CICLOPLAST in Spain and CRAFT in Ireland occasionally develop furniture-focused pilot projects that contribute to circular economy practices (RREUSE, 2023). Although many of these organizations treat furniture as part of durable household goods, they play a vital role in reuse systems with regard to both environmental and social outcomes (Table 3).

Table 3. Selected furniture reuse organizations in Europe

Organization Name	Country	Focus Areas	Type of Implementation	Social Contribution
RREUSE	Multiple (20+ countries)	Furniture, textiles, electronics	Umbrella organization, social store, repair	Social enterprise network, employment
WRAP	United Kingdom	Furniture sector	Guidelines, design protocols, public cooperation	Awareness raising, design-oriented practices
Repair Café	Netherlands-based, 30+ countries	Household goods, furniture, electronics	Volunteer repair workshops	Community engagement, knowledge transfer
ENVIE	France	Furniture, electronics, appliances	Local centers, repair, social store	Employment for disadvantaged groups
RepaNet	Austria	Furniture and household items	Repair, redistribution	Solution to long-term unemployment
AERESS	Spain	Household goods, furniture, electronics	Repair, reuse centers	Social integration

Overall, these examples from across Europe present noteworthy institutional models that combine sustainability and societal benefit. Geographically, organizations focused on furniture reuse and recycling are most concentrated in Western and Central Europe. This concentration reflects the long-standing implementation of circular economy policies, the strong tradition of social entrepreneurship, and robust civil society networks in these regions.

Since the 1990s, the European Union has supported the development of such initiatives through strategies promoting resource efficiency, waste prevention, and eco-design. As a result, social enterprise-based organizations such as RREUSE, ENVIE, Emmaüs Défi, and RepaNet have been institutionalized and expanded through regulatory incentives and financial support. Local governments in countries such as Germany, the Netherlands, France, and Belgium, have reinforced these initiatives through environmentally focused policies and the provision of public production spaces, thereby strengthening community-based practices. Within this context, organizations such as Repair Café and De Kringwinkel not only

contribute to waste reduction but also enhance social inclusion, local employment, and community engagement.

A common feature of these enterprises is their development of multi-actor and multifunctional models that systematically reintegrate bulky items like furniture into reuse systems. These models combine technical infrastructure (repair workshops, logistics systems, collection centers) with social capacity (volunteer engagement, social entrepreneurship and employment for disadvantaged groups).

In addition, supportive environmental policies -including tax advantages, grant programs, and regulatory frameworks- have reinforced these systems. This process involves collaboration not only among social enterprises but also with public institutions and private sector actors. For example, the European Furniture Industries Confederation (EFIC) identified furniture as a priority product group under the Ecodesign for Sustainable Products Regulation, which entered into force in 2024. EFIC has developed technical guidelines, digital product passports, and repair manuals to facilitate the sector's transition to a circular economy. It has also contributed to the sector-specific implementations of regulations such as the "Right to Repair," the "EU Deforestation Regulation," and the "Packaging and Packaging Waste Regulation." According to EFIC's 2024 report, these regulations improve not only environmental performance but also the global competitiveness and social responsibility of the European furniture industry (EFIC, 2024).

Sustainable furniture management in Europe operates through multi-actor structures involving social enterprises, public institutions, and the private sector. This model offers a framework for Turkey, where institutional infrastructure is still developing. Adapting European practices to the local context through collaboration among municipalities, universities, and civil society can reduce furniture waste while strengthening social solidarity, environmental awareness, and sustainable development.

3.4 Current practices and institutional framework for furniture recycling in Turkey

In Turkey, efforts to recover and repurpose furniture waste have expanded in recent years through pilot projects initiated by local governments and supported by volunteer initiatives. However, these practices remain mostly local in scope and lag behind European examples in terms of institutionalization, technical infrastructure, and policy support (Asfuroğlu, 2024). A notable initiative is the program launched by the Istanbul Metropolitan Municipality (İBB) in 2019, which distributes refurbished furniture to people in need. According to 2024 data, Istanbul's solid waste facilities received an average of 16.245 tons of waste daily (İBB, 2024). Likewise, in 2022 the Körfez district of Kocaeli recovered 51.639 tons of household waste (Körfez Municipality, 2024). The EU-funded URBANREC Project, implemented by Bornova Municipality and the İzmir Institute of Technology, represents another pioneering effort, directing unusable furniture to recycling processes while incorporating restorable items into social assistance networks (URBANREC, 2020a). In Gebze and Kartepe, zero-waste policies have been supported through environmental awareness programs, student clubs, and educational activities (Gebze Municipality, 2024; Kartepe Municipality, 2024).

At the national level, the Zero Waste Project, launched in 2017, marked a significant step in waste management but remains limited in addressing bulky waste such as furniture. Educational activities primarily target small-scale waste (e.g., paper, plastic), while awareness of bulky waste is still lacking (Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, 2024). According to the Zero Waste Foundation, the recovery rate increased from 13% in 2017 to 36.08% in 2024, with a national target of 60% set for 2035 (Zero Waste Foundation,

2025). Reaching this goal will require comprehensive, sector-specific policies explicitly covering bulky waste. From a regulatory perspective, the Waste Management Regulation does not directly address furniture waste, and while municipalities are obliged to establish zero-waste systems, monitoring and evaluation procedures remain unclear. Similarly, the National Waste Management and Action Plan (2016–2023) classifies furniture waste as “special household waste” but provides no specific strategy, collection method, or standard for this category (Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization, 2017).

This study includes the municipalities of Istanbul, Kocaeli (Körfez, Gebze, Kartepe), and İzmir (Bornova) because of were their original, sustainable, and publicly accessible practices specifically targeting furniture waste. These municipalities are distinguished by their integrated activities that combine environmental education, social solidarity, and material recovery, along with their commitment to transparent public data sharing. Current practices in Turkey are generally project-based and led by metropolitan or district municipalities. Among them, Istanbul’s model, which links the reuse of furniture waste with social assistance, and the upcycling-oriented URBANREC Project in Bornova, stand out as particularly noteworthy. In Gebze and Kartepe, awareness-raising initiatives targeting children and youth have contributed to public consciousness. From a positive perspective, the integration of zero-waste practices with social responsibility and education, together with transparent data sharing, can be considered indicators of institutional maturity. However, several limitations persist. There is still no centralized recycling strategy for bulky waste such as furniture, and existing initiatives largely remain at the pilot stage. Furthermore, since educational content primarily addresses small-scale waste, public awareness of bulky items remains insufficient (Table 4).

Table 4. Local practices on furniture and household waste recovery in Turkey (2022–2024)

Local Authority / Institution	Summary of Implementation	Year	Achieved Results / Data	Source
Istanbul Metropolitan Municipality	Collection of usable household items, delivery to those in need after maintenance	2024	An average of 16,245 tons of waste disposed of daily	İBB, 2024
Kocaeli / Körfez Municipality	Recovery of household waste	2022	51,639 tons of waste recovered	Körfez Mun., 2024,
İzmir Bornova Municipality + İYTE	Furniture upcycling through the URBANREC Project	2021	Contributions to social aid and material recycling	URBANREC, 2020
Gebze Municipality	Zero waste education, student clubs, and activities in schools	2024	Reached 6,754 students; 5 events organized	Gebze Mun., 2024
Kartepe Municipality	Distribution of zero waste bins and awareness activities	2024	Awareness activities held in schools and public institutions	Kartepe Mun., 2024
Zero Waste Project (General)	Raising waste awareness, educational collaboration with MoNE	2017–2024	Recovery rate reached 36.08% in 2023	Zero Waste, 2019
National Waste Management and Action Plan	Furniture defined as “special household waste” but no implementation standards	2016–2023	Unclear implementation; no mandatory separate collection.	Republic of Turkey MoEUCC, 2017

In this context, key areas for improvement include: clarifying definitions, separation, and recovery standards for bulky waste in legal regulations; providing centralized funding and technical support to scale up local practices; expanding educational content to explicitly include bulky waste; and promoting transparency through systematic monitoring and evaluation mechanisms. Overall, although promising practices exist in Turkey with respect to furniture waste recycling, a comprehensive approach encompassing policy, legislation, and implementation is essential for these efforts to become systematic, institutionalized, and sustainable.

3.5 Comparative evaluation: European and Turkish contexts

In Europe, furniture recycling and repurposing processes are implemented in an integrated manner through robust institutional structures, community-based initiatives, and supportive sustainability policies. These practices serve as examples not only for waste management but also for job creation, social solidarity, and the institutionalization of environmental responsibility. Projects coordinated by networks such as RREUSE, ENVIE, and WRAP are supported by European Union directives, with technical processes documented and the environmental benefits of reuse measured and reported through indicators such as CO₂ savings (Bovea and Pérez-Belis, 2012). Volunteer-based initiatives such as the Repair Café further reinforce this system by promoting a culture of repair and cultivating environmentally conscious citizens. These systems are strengthened by public guidelines, repair workshops, educational programs, and long-term incentive mechanisms. Processes such as sorting, pre-reuse analysis, and environmental impact assessment are conducted under standardized protocols. In contrast, practices related to furniture recycling in Turkey remain largely project-based and dependent on the initiative of local governments. While notable projects implemented in major cities such as Istanbul, Kocaeli, and Izmir -as well as partnerships such as URBANREC- represent significant progress, they lag behind European examples in terms of institutionalization, policy support, incentive mechanisms, and monitoring processes. Most municipalities redistribute discarded furniture as part of social assistance schemes; however, these processes are rarely supported by systematic material analysis, environmental impact measurement, or transparent reporting (İBB, 2024; Gebze Municipality, 2024; URBANREC, 2020b). Moreover, community participation and a culture of volunteering have not yet been developed within an institutional framework in Turkey, and existing activities are often limited-access initiatives sustained through individual efforts. Structural challenges—including the absence of a national strategy or regulations specifically supporting furniture recycling, insufficient financial incentives, and limited technical infrastructure for reuse—continue to constrain progress in this field. The following table presents a comparative analysis of furniture recycling systems in Europe and Turkey based on sustainability criteria (Table 5).

Table 5. Comparative sustainability criteria of furniture reuse practices in Europe and Turkey

Criteria	European Examples	Practices in Turkey
Institutionalization	Developed networks (RREUSE, ENVIE, WRAP), publicly supported systems	Municipal initiatives, project-based practices
Community Participation	Social enterprise-based, voluntary and organized models	Aid-oriented, mainly focused on donations and identifying needs
Material Separation	Documented processes by type, technical analyses	Limited separation, no data-driven system
Education and Awareness	Public guides, workshops, wide-reaching education networks	School-based limited activities, constrained to individual efforts
Policy and Incentives	Long-term planning and incentives supported by EU directives	Regulatory gaps, lack of strategic national policy
Monitoring and Reporting	Annual reports, measurements such as CO ₂ savings	Fragmented or absent reporting, lack of transparency

The multi-actor structures, sustainability-oriented policies, and social participation mechanisms established in Europe can serve as a model for Turkey. Although awareness of waste management has increased in recent years, the lack of a systematic transformation strategy for bulky waste such as furniture has limited the effectiveness of recycling initiatives. This highlights the urgent need for a holistic policy approach that addresses not only technical aspects but also governance structures and societal engagement.

4 Conclusion and Recommendations

- According to the findings of this study, furniture waste recycling practices in Turkey remain largely limited to municipal projects and charity-based initiatives.
- In Europe, institutional networks such as RREUSE and WRAP integrate systematic data collection, sorting, and reuse processes with environmental, social, and economic sustainability objectives.
- In Turkey, recycling processes are characterized by a lack of institutionalization, technical infrastructure, monitoring, and reporting mechanisms.
- Training activities conducted under the Zero Waste Project generally focus on small-scale waste types, and no specific policy or strategy has yet been identified for bulky waste categories such as furniture.
- In European contexts, awareness-raising efforts are supported by institutionalized volunteer-based structures like Repair Café, which emphasize community participation. By contrast, volunteering remains mostly individual and lacks continuity.
- Although municipal practices in various provinces of Turkey are promising, the absence of coordination and standardization across initiatives remains a critical shortcoming.
- Unlike previous studies, this research evaluates practices in Turkey using up-to-date municipal activity reports and legislative frameworks, thereby systematically identifying current deficiencies.

In this context, the following key development areas are recommended:

- Furniture waste should be more clearly defined in legislation as "special domestic waste," with regulations for separate collection established.
- Coordination between local governments should be strengthened, and best practices disseminated more widely.
- Collaboration with universities and non-governmental organizations should be expanded, and community-based repair workshop models should be supported.
- The environmental impacts of reuse and upcycling practices (e.g., CO₂ savings) should be systematically measured and reported with transparency.

Author Contribution

Gizem Büke Öztürk: Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review and editing.

Declaration of financial support

No financial support was received.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

References

- AERESS, (2024). *Asociación Española de Recuperadores de Economía Social y Solidaria*, Retrieved from <https://aeress.org/>
- As, N., ve Büyüksarı, Ü., (2010). Masif ağaç malzemenin bükülmesi, *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 60 (1), 29-37.
- Asfuroğlu, D., (2024). Türkiye'nin döngüsel ekonomiye geçiş performansı üzerine karşılaştırmalı bir analiz, *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 20 (1), 16-36.

- Bovea, M. D., and Pérez-Belis, V., (2012). A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process, *Journal of Cleaner Production*, 20 (1), 61-71, DOI: [10.1016/j.jclepro.2011.07.012](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.012)
- Bullen, P. A., and Love, P. E. D., (2011). Adaptive reuse of heritage buildings, *Structural Survey*, 29 (5), 411-421, DOI: [10.1108/02630801111182439](https://doi.org/10.1108/02630801111182439)
- Canbakal Ataoğlu, N., (2015). Bir tasarım modası olarak ham ahşap ve paletler, *Selçuk Kent Dergisi*, 2, 1088-1099.
- Candan, Z., Tunçel, S., and Serbest, A., (2024). Sürdürülebilirlik ve mobilya endüstrisi, *Ağaç ve Orman*, 5 (1), 18-31. DOI: [10.59751/agacorman.1376623](https://doi.org/10.59751/agacorman.1376623)
- Chapman, J., (2005). *Emotionally durable design: Objects, experiences and empathy*. Earthscan, London.
- Conejos, S., Langston, C., and Smith, J., (2013). AdaptSTAR model: A climate-friendly strategy to promote built environment sustainability, *Habitat International*, 37, 95–103. DOI: [10.1016/j.habitatint.2011.12.003](https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.12.003)
- CPWR – The Center for Construction Research and Training, (2004). *Medium density fiberboard (MDF) safety for carpenters*, Retrieved from <https://www.elcosh.org/index.php>
- Cradle to Cradle Certified, (2024). *Cradle to Cradle Certified® Product Standard*. Retrieved from <https://c2ccertified.org/>
- De Kringwinkel, (2024). *About us*. Retrieved from <https://www.dekringwinkel.be>
- Değirmen-tepe, S., ve Çolak, M., (2021). Türkiye'deki iç mimarlık firmalarının ahşap malzemeleri kullanımı ve tercih düzeyleri, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 4 (2), 193-204, DOI: [10.33725/mamad.1012526](https://doi.org/10.33725/mamad.1012526)
- Demirbaş, D., (2017). Mobilya tasarımı alanında ödül almış ürünlerin tasarlanma ve değerlendirilme süreçlerinde kullanılan kriter ve özelliklerin karşılaştırılması üzerine bir çalışma, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 6, 984-996.
- Dilik, T., ve Gürsoy, S., (2017). Kent mobilyasında ahşap malzeme kullanımı ve seçimine yönelik güncel bir değerlendirme, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 6 (3), 847-856.
- Efe, H., ve Kasal, A., (2007). Çeşitli masif ve kompozit ağaç malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi, *Politeknik Dergisi*, 10 (3), 303-311. DOI: [10.2339/2007.10.3.303-311](https://doi.org/10.2339/2007.10.3.303-311)
- EFIC, (2024). *EFIC Annual Report 2024*. European Furniture Industries Confederation. Retrieved from <https://www.efic.eu/efic-annual-reports>
- Elibol, G. C., Bezci, İ., Dünder Türkkan, V., ve Varol, A., (2018). Mobilya tasarımında yeniden kullanım: Tasarımdan üretime dönüşüm, *Art-E Sanat Dergisi*, 11 (21), 134-156, DOI: [10.21602/sduarte.344513](https://doi.org/10.21602/sduarte.344513)
- Ellen MacArthur Foundation, (2019). *Accelerating the circular economy through commercial deconstruction and reuse*, Retrieved from <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>
- Emmaüs Défi, (2024). *Le Réemploi Solidaire*. Retrieved from <https://emmaus-defi.org>
- European Commission, (2017). *Revision of EU Ecolabel criteria for furniture products: Final technical report*. Retrieved from https://commission.europa.eu/index_en

- European Commission, (2021). *Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*, Retrieved from https://commission.europa.eu/index_en
- Fédération Envie, (2022). *Case study of Envie, France*. FAB-MOVE Project. Retrieved from <https://fabmove.eu/>
- Forest Stewardship Council, (FSC), (2024). *About FSC*. Retrieved from <https://fsc.org/en>
- Gebze Belediyesi, (2024). *T.C. Gebze Belediyesi 2024 mali yılı idare faaliyet raporu* [2024 financial year administrative activity report]. Retrieved from <https://www.gebze.bel.tr/>
- Güneş, S., ve Demirarslan D., (2020). Sürdürülebilirlik ve mobilya tasarımında çevreci yaklaşımlar, *Uluslararası İnsan ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, 5 (6), 81-99.
- Humana Nova, (2024). *Social cooperative*. Retrieved from <https://humananova.org>
- Interreg Europe, (2022). *Policy brief on reuse and repair in a circular and social economy*. Retrieved from <https://www.interregeurope.eu/>
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi., (2024). *2024 faaliyet raporu* [2024 annual activity report]. Retrieved from <https://ibb.istanbul/>
- Kartepe Belediyesi., (2024). *Kartepe Belediyesi faaliyet raporu* [Kartepe Municipality activity report]. Retrieved from <https://www.kartepe.bel.tr/>
- Kershaw, D., (2020). *Benefits of reuse – domestic furniture*. Furniture Bank. Retrieved from <https://www.furniturebank.org/>
- Köksal, S. E., and Kelleci, O., (2020). Yonga levha (sunta) ve MDF kullanan mobilya-dekorasyon firmalarının sorunları: Bolu örneği, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 22 (1), 133-143. DOI: [10.24011/barofd.631703](https://doi.org/10.24011/barofd.631703)
- Körfez Belediyesi., (2024). *Körfez Belediyesi 2024 faaliyet raporu* [2024 annual activity report]. Retrieved from <https://korfez.bel.tr>
- Kutlu, İ., ve Bekar, İ., (2021). Tarihi yapıların yeniden işlevlendirilme sürecinde cam kullanımı: Trabzon Kızlar Manastırı örneği, *Karadeniz Araştırmaları Enstitüsü Dergisi*, 7 (13), 199-231. DOI: [10.31765/karen.987073](https://doi.org/10.31765/karen.987073)
- Manzini, E., and Vezzoli, C., (2003). A strategic design approach to develop sustainable product service systems: Examples taken from the ‘Environmentally Friendly Innovation’ Italian Prize, *Journal of Cleaner Production*, 11 (8), 851-857.
- McDonough, W., and Braungart, M., (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press, New York.
- Oğurlu, İ., (2024). Doğal-ekolojik üç yapı malzemesi taş-kerpiç-ağşabın sürdürülebilirlik analizi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (53), 150-167, DOI:[10.5281/zenodo.10646951](https://doi.org/10.5281/zenodo.10646951)
- OpenDesk, (2020). *Furniture designed for inspiring workplaces*. Retrieved from <https://www.opendesk.cc/>
- Özel, Y., ve Kayacan, B., (2020). Seri, bant üretimin mobilya tasarım - üretim sürecine etkisi ve modüler mobilya, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 623-632. DOI: [10.31590/ejosat.742261](https://doi.org/10.31590/ejosat.742261)
- Pei X., Italia M. and Melazzini, M., (2024). Enhancing circular economy practices in the furniture industry through circular design strategies, *Sustainability*, 16 (15), 1-31.

- PEFC, (2024). *What is PEFC?* Retrieved from <https://pefc.org/>
- Reclaim, (2024). *How furniture upcycling has come of age.* Retrieved from <https://www.reclaimmagazine.uk/>
- Repair Café Foundation, (2024a). *About Repair Café.* Retrieved from <https://www.repaircafe.org/en/about/>
- Repair Café Foundation, (2024b). *WD-40 Company and Repair Café International Foundation Join Forces to Encourage People to Start Repairing and Stop Wasting.* Retrieved from <https://investor.wd40company.com>
- Repair Café Foundation, (2025). *About.* Retrieved from <https://www.repaircafe.org/en/>
- RepaNet, (2024). *Re-Use and Repair Network Austria.* Retrieved from <https://www.repanet.at/>
- RREUSE, (2023). *Our members and projects.* Retrieved from <https://www.rreuse.org>
- RREUSE, (2025). *Who we are.* Retrieved from <https://www.rreuse.org/>
- Schmitz, H., (2015). *48 ideas for recycling old pallets, tires and even the whole cars,* Retrieved from <https://livinator.com/>
- Soex Group, (2023). *Sustainability through textile recycling,* Retrieved from <https://www.soex.de>
- Stahel, W. R., (2016). The circular economy, *Nature*, 531 (7595), 435-438. DOI: [10.1038/531435a](https://doi.org/10.1038/531435a)
- Sung, K., (2017). *Sustainable production and consumption by upcycling: Understanding and scaling-up niche environmentally significant behaviour,* Nottingham Trent University, School of Architecture, Design and the Built Environment, Doctoral Dissertation, Nottingham, United Kingdom.
- Superuse, (n.d.). *About us.* Retrieved from <https://www.superuse-studios.com/about-us/>
- Şenkal, H., (2023). Mobilya endüstrisinde döngüsel ekonomiye geçiş: değerlendirme yaklaşımı, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 6 (2), 146-161. DOI: [10.33725/mamad.1316221](https://doi.org/10.33725/mamad.1316221)
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2017). Ulusal atık yönetimi ve eylem planı (2016–2023) [National waste management and action plan (2016–2023)]. <https://www.csb.gov.tr/>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). 2024 yılı birim faaliyet raporu [2024 annual activity report]. <https://www.csb.gov.tr/>
- URBANREC, (2020a). *New approaches for the valorisation of URBAN bulky waste into high added value RECycled products,* CORDIS - EU research results. DOI: [10.3030/690103](https://doi.org/10.3030/690103)
- URBANREC, (2020b). *URBANREC guidelines.* Retrieved from <https://www.acrplus.org/en/>
- Vezzoli, C., and Manzini, E., (2008). *Design for environmental sustainability.* Italy: Springer.
- Vidholdová, Z., Slabejová, G., and Šmidriaková, M., (2021). Quality of oil- and wax-based surface finishes on thermally modified oak wood. *Coatings*, 11 (143), 1-17. DOI: [10.3390/coatings11020143](https://doi.org/10.3390/coatings11020143)

- WCED, (1987). *World commission on environment and development: our common future*, Brundtland Report, 17 (1), 1-91.
- Wikipedia, (2024). *RREUSE*. Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/RREUSE?utm>
- WRAP, (2021a). *Net zero: Why resource efficiency holds the answers*. Retrieved from <https://www.wrap.ngo/resources/report/net-zero-why-resource-efficiency-holds-answers>
- WRAP, (2021b). *What we do*. Retrieved from <https://www.wrap.ngo/what-we-do>
- Yalçınkaya, Ş., ve Karadeniz, İ., (2022). Sürdürülebilir mimari tasarımda atık malzemenin yeri, *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi*, 7 (2), 750-762. DOI: [10.30785/mbud.1168291](https://doi.org/10.30785/mbud.1168291)
- Yağan Köylü, N.B., (2023). Tarihi yapıların sürdürülebilirlik bağlamında yeniden işlevlendirilmesi: Aydın Cumhuriyet Mektebi, *İdil*, 12 (107), 982-1008. DOI: [10.7816/idil-12-107-10](https://doi.org/10.7816/idil-12-107-10)
- Yararel Doğan, B., Arslan, K., ve Arpacı, G. S., (2022). Bireylerin retro mobilya tercihinin kuşaklararası analizi, *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 12 (2), 579–594.
- Zero Waste Foundation. (2025). *The Zero Waste Movement, now a global language, turns 8*. Retrieved from <https://sifiratikvakfi.org/>



Determination of dielectric properties in oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) wood

Beytullah Bozali^{1*} 

ABSTRACT: Today, the wood of the oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky.) is widely used in various applications, including furniture, musical instruments, carvings, and veneer. In this study, the dielectric properties of oriental beech were investigated at AC signal frequencies of 100 Hz–1 MHz in the voltage range of 0–100 V DC, and the effects of different surface conditions on these properties were investigated. The dielectric, thermal and surface free energy behaviors of control wood (CW) and wood soaked in water for two weeks (SW) were analyzed comprehensively. Basic parameters such as specific heat capacity (C_p), real (ϵ') and imaginary (ϵ'') dielectric constants, alternating current electrical conductivity (σ_{ac}), free energy component (G/ω), dielectric loss factor ($\tan\delta$) were evaluated in detail within the scope of experimental measurements. SW samples exhibited approximately 1,000-fold higher (ϵ'') values and a two-to three-fold increase in ($\tan\delta$) compared to CW samples. Furthermore, (σ_{ac}) increased from $\sim 10^{-9}$ S/m in CW to $\sim 10^{-4}$ S/m in SW, indicating a significant increase in ionic conductivity due to the higher moisture content. CV samples maintain their insulation properties by showing consistent dielectric properties across the entire frequency range. All measurements were repeated three times ($n=3$) and the standard deviation was found to be less than 5%. These results show that whereas dry wood retains consistent dielectric performance with low losses, moisture dramatically increases conductivity and dielectric losses.

Keywords: Oriental beech, Dielectric properties, AC conductivity, Frequency

Doğu kayını (*Fagus orientalis* Lipsky.) odununda dielektrik özelliklerinin belirlenmesi

ÖZ: Günümüzde doğu kayın (*Fagus orientalis* Lipsky.) odunu, mobilya, müzik aletleri, oymacılık ve kaplama malzemesi gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, doğu kayınının 100 Hz–1 MHz AC sinyal frekanslarında ve 0–100 V DC gerilim aralığında dielektrik özellikleri incelenmiş ve farklı yüzey koşullarının bu özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kontrol grubu ahşap (CW) ve iki hafta suda bekletilmiş ahşap (SW) örneklerinin dielektrik, termal ve serbest yüzey enerjisi davranışları kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Deneysel ölçümler kapsamında, özgül ısı kapasitesi (C_p), gerçek (ϵ') ve sanal (ϵ'') dielektrik sabitleri, alternatif akım elektriksel iletkenlik (σ_{ac}), serbest enerji bileşeni (G/ω), dielektrik kayıp faktörü ($\tan\delta$) gibi temel parametreler detaylı olarak değerlendirilmiştir. SW örnekleri CW örneklerine kıyasla yaklaşık 1.000 kat daha yüksek (ϵ'') değerleri ve ($\tan\delta$)'de iki ila üç kat artış göstermektedir. Ayrıca, (σ_{ac}) CW'de $\sim 10^{-9}$ S/m'den SW'de $\sim 10^{-4}$ S/m'ye yükselerek, daha yüksek nem içeriği nedeniyle iyonik iletkenlikte önemli bir artış olduğunu göstermektedir. CV numuneleri tüm frekans aralığında tutarlı dielektrik özellikler göstererek yalıtım özelliklerini korumaktadır. Tüm ölçümlerin üç kez tekrarlanmış ($n=3$) ve standart sapmanın %5'ten küçük bulunmuştur. Bu sonuçlar, kuru odunun düşük kayıplarla tutarlı dielektrik performansını korurken, nemin iletkenliği ve dielektrik kayıplarını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Doğu kayını, Dielektrik özellikler, AC iletkenliği, Frekans

1 Introduction

The dielectric properties of a non-conducting material describe its interaction with electric fields. The dielectric constant is defined as the rate of increase in capacitance of a material in a capacitor compared to a vacuum and is the primary measure of its energy storage capacity (James, 1975). While electrical techniques such as resistivity measurement are widely used because moisture levels affect structural performance, data correction is necessary due to material properties and temperature effects (Otten et al., 2017). Numerous characteristics of electrical conductivity in wood have been documented, including temperature and moisture, hemicellulose, cellulose and lignin, mechanical structure, etc. (Husein and others, 2014). The literature also reports that it fluctuates, especially with respect to electric field frequency and moisture content (James, 1975).

There are many studies in the literature on oriental beech. Some of these studies investigated the screw retention strength of plywood produced with poplar, beech, and eucalyptus veneers (Bal et al., 2015). The effects of color bleaching and varnishing processes applied to oriental beech on the flame-induced combustion characteristics of the material were investigated in another study in the literature (Yalınkılıç et al., 2020). Some of the other studies in the literature are the experimental and numerical analysis of the bending behavior of particleboard and fiberboard reinforced with plywood (Güntekin and Uysal, 2024) and the effect of light intensity on the burning performance of paints used in wood and wood-based panels (Kara et al., 2024).

There is significant research examining the relationship between dielectric properties and environmental and structural parameters parallel to these materials studies. In liquid crystal systems, both real and imaginary components of dielectric permittivity have been successfully predicted depending on frequency, voltage, and doping ratio (Aksoy et al., 2023). In another study, the dielectric behavior of SBR/NR-based rubber insulator material was investigated experimentally under different voltage and frequency conditions. The change in $\tan\delta$ value in high voltage and frequency applications was analyzed (Akın and Arıkan, 2020). The dielectric properties of rock and pellet samples prepared from jet samples were investigated in the frequency range of 5 Hz–13 MHz under different moisture contents. The measurements revealed that the dielectric constant varied between 3.2–4.4 for the rock sample and 2.9–3.9 for the pellet sample (El Mamı, 2024). They introduce Chapidif, a software that models and analyzes the dielectric functions of aluminum. They note that comparisons with experimental data, such as reflected electron energy loss, improve the model's accuracy and dielectric characterization capabilities (Vos and Grande, 2025). Bentonite composites containing different proportions of cobalt (1%) and nickel (5%) were prepared and, their dielectric and structural properties were investigated (Bashal et al., 2025). The dielectric properties of the χ_3 Borophene structure were investigated by Monte Carlo simulations and the ferroelectric–paraelectric transition behavior of the material was revealed under the influence of crystal field, temperature and coupling forces (Sabbah et al., 2025). CdTe nanoparticles doped with Ni^{2+} ions were synthesized using a microwave-assisted method and were determined to have a hexagonal crystal structure with dimensions of 23–25 nm. Dielectric measurements revealed that the dielectric constant and loss decreased as the frequency increased in the 10 Hz–10 MHz frequency range (Tiwary et al., 2025). $(\text{Bi}_{0.85}\text{La}_{0.15})(\text{Fe}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ ceramic compound was synthesized by the conventional solid-state reaction method, and the dielectric, impedance and magnetic properties of the material were analyzed comprehensively (Joshi et al., 2025). The dielectric properties of starch were also investigated.

This study is based on the hypothesis that water uptake in oriental beech wood significantly increases ion polarization and charge accumulation at the interface, leading to higher dielectric losses (ϵ'' , $\tan\delta$) and higher alternating current conductivity (σ_{ac}) compared to dry wood samples. The study sought to determine how frequency and moisture content affect the storage behavior and dielectric loss of oriental beech wood compared to other hardwood species. The effects of wood on its dielectric response are also thoroughly investigated to close a significant gap in the research. Although there is much dielectric research for different types of wood, there are currently few systematic investigations on oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky.). Its dielectric response (ϵ' , ϵ''), AC conductivity, and polarization mechanisms across a broad frequency range (100 Hz to 1 MHz) have not been well studied. This study aims to close this gap, theoretically defining the underlying mechanisms and physically interpreting them by thoroughly analysing the dielectric characteristics of oriental beech samples (CW and SW). We also expect to lay a strong basis for interdisciplinary applications such as thermoelectric converters and hybrid acoustic-dielectric materials by elucidating the energy storage and dissipation mechanisms of wood.

2 Materials and Methods

We have chosen a frequency range of 100 Hz to 1 MHz to capture the most important dielectric relaxation events in wood. Ionic and electronic polarization processes predominate above 100 kHz. These processes have been reported in the literature for a range of wood species and composites (Pentoś et al., 2017; Elloumi et al., 2021; Sahin and Ay, 2004). The range of DC voltages used in this study was between 0 and 100 V and chosen to avoid polarization and conduction and to excite the material sufficiently to maintain sample integrity. Similar mechanisms have been reported in studies of oriental beech and other hardwoods. (Torkaman et al., 2022). All electrophysiological measurements in this study were conducted in a controlled laboratory at 20–24 °C and 60–65% relative humidity. Moreover, the consistency and repeatability of the electrical properties were maintained. All voltage measurements were repeated three times for each sample to ensure repeatability. (n = 3) These results represent the mean values of these three replicates.

2.1 Sample preparation

CW test samples were prepared with dimensions of 500 mm x 70 mm x 15 mm, and SW test samples were prepared with dimensions of 250 mm x 70 mm x 15 mm. CW: The untreated control group's samples. The test samples were kept in a lab setting after being air-dried. (20–24°C, 60–65% RH) SW: Water was collected during the trial, and samples were kept in distilled water for two weeks in this experimental group. Its moisture level is typically between 10% and 12%. (Glass and Zelinka, 2010). The SW samples were submerged in water until the humidity level surpassed 100% for two weeks. The electrodes were affixed to the sample's contact surface to create an electric field perpendicular to the conductors. This arrangement was chosen because it ensures a consistent voltage response and reduces anisotropic variability in the spectrum measurements. The CW and SW groups are oriented in the same way to guarantee comparability. This study does not evaluate other grain orientations, such as longitudinal or tangential. As a result, the radial orientation was regulated and maintained during all measurements. Our selection of a constant orientation is further supported by earlier research that discovered significant anisotropy of dielectric characteristics dependent on grain direction in oriental beech wood and other hardwoods (Sahin and Ay, 2004).

2.2 Electric Field

The electric field is defined as the force acting on a unit positive charge and is a vector quantity. Mathematically, the electric field is expressed in Equation (1).

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1)$$

In Equation (1), $\vec{E}$ is the electric field vector (N/C or V/m), $\vec{F}$ is the electric force acting on the load, and q is the test load. The presence of an electric field allows the dipoles to align in the direction of the field and create macroscopic polarization in the material (Tinga and Nelson, 1973; Vaydoğan, 2017). When an electric field (E_{applied}) is applied to a dielectric material, the molecular dipoles are reoriented, creating a dipole field (E_{dipole}) in the opposite direction. The rearrangement of charges within the material results in polarization (P), which can lead to a decrease in the net electric field. The polarization Equation is given in Equation (2).

$$P = \varepsilon_0 X_e E \quad (2)$$

In Equation (2), P represents the polarization, ε_0 the permittivity of the gap, X_e the electrical susceptibility, and E the electric field applied to the system.

2.3 The Measurement of dielectric properties

Two opposing surfaces of each test sample were covered with 20 mm-wide self-adhesive copper conductive tape to take measurements in the dielectric spectroscopy (DS) experimental setup. Figure 1A The LCR measuring device probes were attached to 10 mm-long sections of the copper conductive tape, creating a capacitor-like structure within the test samples exposed to alternating electric fields. Figure 1B Synchronization between the test system and the test system was verified using an oscilloscope placed at the connection points. A DC bias voltage of up to 100 V is applied in dielectric spectroscopy experiments. This value is chosen to provide sufficient field strength to activate polarization and conductivity phenomena in the samples, thus preventing dielectric breakdown. The selected bias range also corresponds to the safe operating limits of the LCR measurement system (GW Instek 8105G) and is consistent with similar studies on wood and other polymeric insulation materials (Barsoukov and Macdonald, 2005; Elloumi et al., 2021).

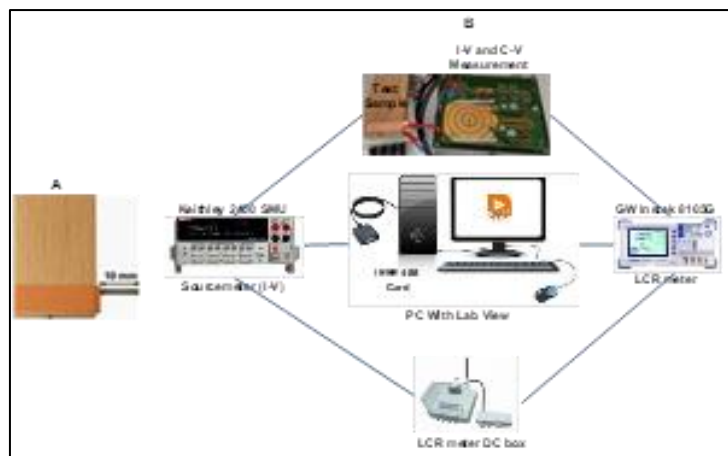


Figure 1. (A) Image of the test sample and (B) DS measurement system used in the study (Demir et al. 2024; İbrahimoglu et al. 2024; Ramazanoğlu et al. 2025)

Figure 1 Measurement and recording of electrophysical parameters are achieved using a GW Instek 8105G LCR measuring device capable of measuring in the frequency range of 20 Hz to 5 MHz (İbrahimoglu et al., 2024). The upper frequency limit was chosen as 1 MHz, which corresponds to the reliable operating range of the Instek 8105G GW LCR measuring device used in this study. This limitation was observed in studies where significant relaxation processes were observed below 1 MHz. Similar results were obtained in the literature survey on wood and wood-based composites. (Sahin and Ay, 2004; Pentoş et al., 2017; Elloumi et al., 2021) Beyond this range, electron polarization artefacts and germ forces may affect accurate characterization. Dielectric property measurements were determined using an impedance analysis system equipped with a Keithley 2400 SMU and a GW Instek 8105G LCR measuring device, powered by a computer with an IEEE 488 interface card (Demir et al., 2024; Ramazanoğlu et al., 2025).

The accuracy of the measurement system was validated by us before testing the two test samples. The LCR meter was calibrated with dielectric materials such as air ($\epsilon' \approx 1.0$), PTFE ($\epsilon' \approx 2.1$), and glass ($\epsilon' \approx 4.5-7.0$) (Von Hippel, 1954; Markham, 1964). The determined values agreed with data reported in the literature with a deviation of less than 3%. In addition, the LCR device (GW Instek 8105G) was calibrated at the factory and thoroughly validated according to internal standards (Barsoukov and Macdonald, 2005). System synchronization was tested using an oscilloscope to determine the reliability of the brake response. A low AC signal was applied to the LCR meter to characterize the voltage. Synchronization between the devices was verified with an oscilloscope at the contact points to ensure reliable acquisition of (ϵ'), (ϵ''), $\tan\delta$, and (σ_{ac}) values over the entire frequency range studied.

The specific heat capacity of the system, C_p (C), is related to the complex dielectric constant.

$$C = C_0 \epsilon' \quad (3)$$

$$\frac{G}{\omega} = C_0 \epsilon'' \quad (4)$$

The capacitance C_0 and conductivity (G/ω) values of the composite medium, depending on the frequency, are represented by Equations (1) and (2). In Equations (3) and (4), C is the capacitance, G is the conductivity, $\omega=2\pi f$ is the angular frequency, (ϵ') is the real dielectric constant (energy storage), (ϵ'') is the imaginary dielectric constant (energy loss), $C_0=\epsilon_0.A/d$ is the geometric capacitance. ϵ_0 is the dielectric permittivity, A is the measured contact area of the composite medium, and d is the thickness of the composite medium (Wei et al., 2016; Demir, 2025).

3 Results and Discussion

In this study, the basic material properties of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky.) are discussed. Literature indicates that oven-dry density varies between 0.63 and 0.72 g/cm³, and porosity is generally 58-62% (depending on the growing area and anatomical structure). The fiber saturation point (FSP) of beech is generally around 30% moisture content, indicating the transition between bound and free water in the cell walls. These parameters provide important information for understanding the dielectric behavior of wood under different frequency and humidity conditions (Glass and Zelinka, 2010; Sahin and Ay, 2004; Torkaman et al., 2022).

Equations (3)-(4) help understand the variation of properties such as capacity C_p with frequency. The relationship of C_p with frequency is indirectly related to the variation of (ϵ')

and (ϵ'') (Kao, 2004). Figure 2a below shows the oriental beech capacitance-frequency variation.

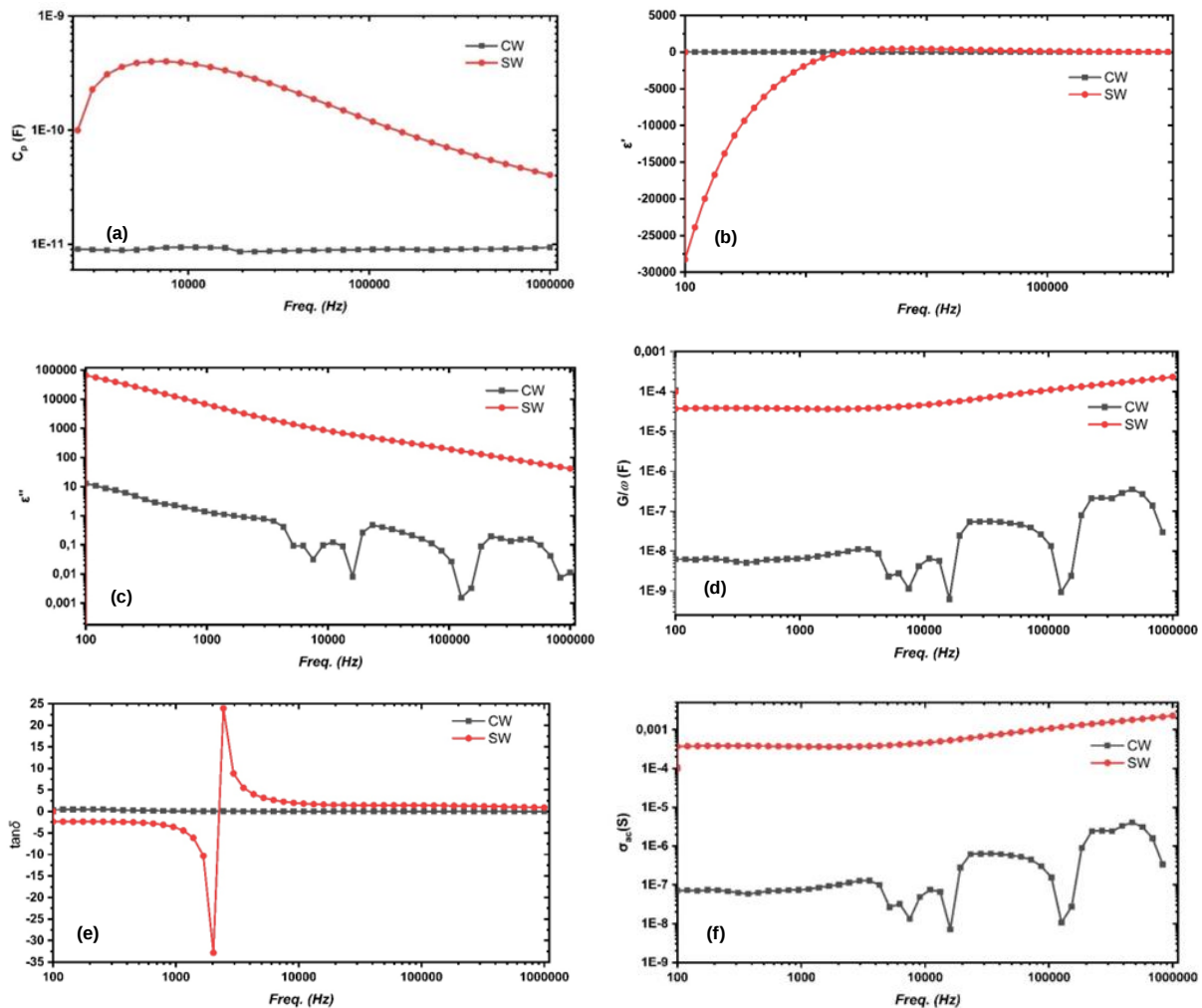


Figure 2. a) Capacitance-frequency variation, b) frequency-dependent behavior of the real dielectric permittivity, c) frequency-dependent behavior of the imaginary permittivity, d) frequency-dependent conductance (G/ω) plot, e) frequency-dependent dielectric loss factor ($\tan\delta$) behavior, f) frequency-dependent variation of AC electrical conductivity

The C_p - F graph in Figure 2a shows the change in specific heat capacities (C_p) of two different test samples based on oriental beech, CW and SW, with frequency. While capacitance is a fundamental parameter characterizing the electric charge storage capacity of a material, conductivity is related to the mobility of electrical charge carriers. Ondo-Ndong et al. stated that the decrease in capacitance values observed in materials is inversely proportional to the increase in conductivity values (Ondo-Ndong et al., 2018). Similar trends are observed in dielectric studies on wood composites, where capacitance decreases steadily with increasing frequency, reflecting a weakening of dipolar polarization at high frequencies (Nottingham et al., 2003; Porebska et al., 2021).

The experimental CW sample shows extremely low C_p values ($\sim 1E-11$ F) throughout the whole frequency range. Both dry and wet surfaces are more polarized and have higher dielectric constants (ϵ' and ϵ''). These findings suggest that solute solubility at low and dry temperatures promotes corrosion susceptibility and corrosion product breakdown (Sahin and

Ay, 2004; Pentoś et al., 2017; Glass and Zelinka, 2010). These results may indicate that the absence of moisture significantly limits the energy storage capacity of wood in alternating electric fields. The increased capacitance (C_p) observed in SW samples at frequencies up to 10 kHz can be attributed to the combined effects of ionic and interface polarization (Maxwell-Wagner-Sillars), which lead to charge accumulation at the interfaces between cell wall components and adsorbed water (Sahin and Ay, 2004; Pentoś et al., 2017; Sugimoto et al., 2005). The consistent drop in C_p above 10 kHz indicates that dipoles and interface charges are less able to track an electric field that is changing quickly. This frequency-dependent dielectric dispersion seems to fit Jonscher's description of the universal dielectric response (Jonscher, 1977). Although a detailed curve fitting (e.g., Debye or Cole-Cole modeling) was not performed in this study, the observed trends are consistent with established theoretical frameworks for dielectric relaxation in wood-based materials (Jonscher, 1977; Pentoś et al., 2017).

We can assess the electrical response of a material with both resistive and reactive components using the complex impedance approach, which is frequently employed in dielectric research. The complex impedance Z^* is defined as the sum of the real Z' and imaginary Z'' components. The real (ϵ') and imaginary (ϵ'') components of the dielectric constant are derived by Equations (6) – (9) based on the expression for complex impedance (Z^*) defined in Equation (5) (Gencel et al., 2024; İbrahimoglu et al., 2024; Demir, 2025).

$$Z^* = Z' + jZ'' \quad (5)$$

Using the impedance spectrum, the complex dielectric constant ϵ^* is obtained as in Equation (6).

$$\epsilon^* = \frac{1}{j\omega Z^*} = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (6)$$

In Equation (4), ϵ^* represents the complex permittivity, $\omega=2\pi f$ represents the angular frequency, and C_0 represents the gap capacitance. The real (ϵ') and imaginary (ϵ'') components of the complex dielectric constant are calculated as follows using Equation (4).

$$\epsilon' = \frac{1}{\omega C_0} \cdot \frac{Z''}{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (7)$$

$$\epsilon'' = \frac{1}{\omega C_0} \cdot \frac{Z'}{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (8)$$

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (9)$$

In Equations (7)-(9), C_0 represents the capacitance of free space. In Equation (9), ϵ_0 represents the dielectric permittivity of the composite medium and d represents the thickness of the composite material (Demir, 2025).

The ϵ' - f plot shown in Figure 2b examines the true dielectric constant (ϵ') values of oriental beech CW and SW test samples in the frequency range of 100 Hz–1 MHz.

The CW test sample (ϵ') remained positive and constant (in the range of ~1–10) and showed no significant variation with frequency. This indicates a low density within the sample and limited directivity. Its stability, even at high frequencies, demonstrates that the

structure is highly insulating, homogeneous, and has low losses. Therefore, the CW structure can be recommended as a reliable insulating material for applications requiring high-frequency stability.

(ϵ') for SW samples exhibit a pronounced dielectric dispersion up to ~ 10 kHz, followed by stabilization between 30 and 50 kHz. This behavior is consistent with the interface polarization (Maxwell-Wagner-Sillars) at low frequencies and the universal dielectric response reported in dielectric studies of wood and composites (Sahin and Ay, 2004; Jonscher, 1977; Pentoś, et al., 2017; Sugimoto, et al., 2005; Duchow and Gerhardt, 1996).

At very low frequencies, an unusual negative permittivity ($\sim -30,000$) is observed in the SW group (Figure 2b). It is due to electrode polarization and charge accumulation at the sample-electrode interface. Similar anomalous dielectric dispersion effects have been reported for wet wood and other high-loss dielectric systems (Sugimoto, et al., 2005; Torgovnikov 1993; Barsoukov and Macdonald 2005). Therefore, negative (ϵ') values at low frequencies should be interpreted as an experimental manifestation of interface polarization rather than an intrinsic negative dielectric constant of the material.

SW samples exhibit strong dielectric dispersion at low frequencies, with (ϵ') values decreasing sharply up to ~ 10 kHz and then gradually stabilizing. This behavior is consistent with previous dielectric studies on hardwoods, which reported that the intrinsic permittivity (ϵ') decreases with increasing frequency due to interfacial and ionic polarization mechanisms. For instance, Pentoś et al. (2017) discovered that hardwood species like birch and oak had high (ϵ') values at low frequencies, which decrease at ~ 5 kHz. This trend is like our SW results. Similarly, a USDA Forest Products Laboratory report indicates that ϵ' in wet wood can vary between $\sim 10^3$ – 10^5 at 1 kHz but stabilizes at ~ 10 – 100 at 1 MHz, depending on density and moisture content (Glass and Zelinka, 2010). Compared to these studies, our results show slightly larger scattering magnitudes, which is due to the higher free water content in the SW samples. In contrast, the CW samples exhibit nearly frequency-independent behavior, consistent with drywood systems described in the literature.

The ϵ'' -F plot presented in Figure 2c compares the dielectric losses of the CW and SW materials of two different test samples of oriental beech, using imaginary permittivity (ϵ'') values measured in the range of 100 Hz–1 MHz. Real permittivity (ϵ') represents the energy storage capacity of the system. Virtual permittivity (ϵ'') reflects the energy loss under the applied alternating electric field, i.e., the fraction converted into heat (Glass and Zelinka, 2010; Pentoś et al., 2017; Sahin and Ay, 2004; Porebska et al., 2021). In dielectric constant calculations based on complex impedance parameters, the (ϵ'') value is defined by Equation (8).

(ϵ'') for SW decreases from $\sim 10^5$ to $\sim 10^2$ in the range 10^2 – 10^6 Hz. The average slope on a logarithmic scale is approximately -0.7, corresponding to a Jonscher exponent of $s \approx 0.3$. This is consistent with the dielectric response of disordered dielectric systems and shows dispersion determined by interfacial and ionic polarization processes at low frequencies (Jonscher, 1977; Barsoukov and Macdonald, 2005). The high (ϵ'') values in SW samples, which gradually decline with frequency, show conductivity loss ($\sigma/\omega\epsilon_0$), which is mostly caused by ion mobility in the adsorbed water phase. The dipolar relaxation of polar groups and bound water is the main cause of the low (ϵ'') values and slight frequency dependency observed in CW samples. These results confirm that conductivity losses dominate SW, while dipolar relaxation determines the dielectric response in CW SW (Jonscher, 1977; Barsoukov and Macdonald, 2005).

As seen in Figure 2c, the SW model's permittivity (ϵ'') is much larger than the CW model's and progressively drops with frequency, showing considerable dielectric loss from water polarization and ionic conduction. This outcome is consistent with previous research showing that hardwoods exhibit higher (ϵ'') values than softwoods due to their lower density and porosity, especially at low frequencies (Pentoš, et al., 2017). For example, oak has a 425% higher absorption coefficient than spruce at approximately 110 kHz, suggesting that pore structure and anatomy influence the dielectric properties. Sahin and Ay (2004) discovered that density and moisture content had a major impact on the dielectric loss of wood, with larger moisture concentrations (ϵ'') rising in the frequency range. They consistently show that the low and flat values (ϵ'') of the CW model suggest relatively little ion transfer by dipole relaxation, while the high values (ϵ'') of the SW model are due to the combined effect of adsorbed water and interface polarization. At very low frequencies, the electrode polarization effect is caused by charge deposition between the electrode and the sample, which can artificially increase the apparent dielectric constant. Furthermore, negative values of (ϵ') are observed at high humidity, which is related to the polarization and the dominant conductivity properties of the Maxwell-Wagner interface. There are different studies in literature to explain the dielectric behavior of wood-based materials (Barsoukov and Macdonald, 2005; Jonscher, 1977; Sahin and Ay, 2004).

Several physical processes, including segmental transition, polarization relaxation, and light loss, affect the free energy ratio (G/w) of devices under alternating current. This process is mainly related to the complex dielectric constant (ϵ'') described by Equation (10).

$$\frac{G}{w} = C_0 \epsilon'' \quad (10)$$

In Equation (10), G is the conductivity (S), $\omega=2\pi f$ is the angular frequency (rad/s), $C_0=\epsilon_0 \cdot A/d$ is the geometric capacitance, and (ϵ'') is the dielectric loss component (Macdonald, 1992; Demir, 2025; Barsoukov and Macdonald, 2005). Equation (11) can be used to conceptualize alternating current (AC) as the conductivity (σ_{ac}) and the loss of conductivity.

$$\sigma_{ac}(\omega) = \epsilon_0 \omega \epsilon'' \quad (11)$$

Equation (11) determines the electrical conductivity (σ_{ac} (S)) and AC conductivity (S/m) by considering the dielectric loss. Equation (11) uses ϵ_0 for the gap's dielectric constant (8.854×10^{-12} F/m) and (ϵ'') for the dielectric loss constant.

$$\sigma_{ac} = A \cdot \omega^s \quad (12)$$

The frequency-dependent conductance in Equation (12) is determined by an exponential parameter, s , and a constant conductance factor, A . The features of a wood-based system's frequency-dependent conductance and conduction mechanism are described by Equation (12). The system's conductance (ϵ'') changes with frequency. Low conductivity shows the system's ability to store energy and provide insulation, whereas high conductivity suggests that the system tends to lose energy (Macdonald, 1992; Barsoukov and Macdonald, 2005; Demir, 2025). Material's ability to store energy in an alternating field is represented by its real permittivity (ϵ'), which is mostly caused by electronic, dipolar, and interfacial polarization (Maxwell-Wagner polarization). Equation (11) establishes a direct relationship between the alternating current conductivity (σ_{ac}) and the imaginary permittivity (ϵ''), which represents dielectric losses resulting from delayed dipolar orientation and charge carrier hopping. The frequency dependence of (σ_{ac}), generally described by Jonscher's power law Equation (12),

shows hopping and relaxation at low to moderate frequencies, while dipolar and electronic polarization dominate at higher frequencies. The dielectric loss tangent ($\tan\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$) represents the ratio of the energy lost to the energy stored. Low $\tan\delta$ values indicate high dielectric stability, while high $\tan\delta$ values can correspond to significant losses of relaxation (Jonscher, 1977; Barsoukov and Macdonald, 2005).

The G/ω -F plot shown in Figure 2d shows the frequency-dependent free energy conductance of two different test samples of oriental beech in the frequency range of 100 Hz–1 MHz. G/ω represents the energy loss per unit frequency. High values in SW indicate conduction loss dominated by ion movement, while low values in CW reflect insulation behavior with minimal loss (Barsoukov and Macdonald, 2005; Jonscher, 1977). The predominance of ionic conductivity and ongoing energy loss through water-mediated charge transfer are confirmed by the G/ω values in SW samples, which stay high ($\sim 10^{-4}$ F) and appear to increase progressively over the entire measurement range.

Continuous wave samples have much lower G/ω values ($\sim 10^{-8}$ – 10^{-7} F) and show minor oscillations above 10 kHz, which are likely due to weak interface polarization and measurement aberrations. Overall, these results demonstrate that while SW samples exhibit substantial conductive loss behavior, continuous wave samples function as insulating systems with minimal energy loss (Barsoukov and Macdonald, 2005; Jonscher, 1977). Similar results were noted by Sugimoto et al. (2005). They asserted that moist wood exhibited higher conduction losses due to Maxwell-Wagner interface polarization, but dry samples behaved more like insulating systems. Furthermore, Pentoś et al. (2017) discovered that hardwoods with higher moisture content consistently displayed increases in dielectric loss characteristics across the whole frequency range, suggesting that absorbed water may contribute to increased ion mobility. These similarities support the hypothesis that SW samples display the normal conduction loss behavior of wet hardwood, even while differences in the fluctuation patterns of CW samples may suggest density- or structure-dependent relaxation anomalies.

The $\tan\delta$ -F diagram comparing the dielectric dissipation of SW materials with CW samples in the 100 Hz to 1 MHz frequency range is displayed in Figure 2e. The loss factor ($\tan\delta$) is an important parameter since it indicates the energy loss relative to the energy storage capacity of a dielectric material. The CW samples had modest $\tan\delta$ values and little polarization loss. The SW material, on the other hand, had a decrease in $\tan\delta$ with frequency, a sign of the relaxation impact of the water. ($\tan\delta$) is referred to as the primary parameter that describes a system's dynamic loss. It is crucial to comprehend how power conversion systems and high-frequency equipment operate. Equation (13) calculates the loss factor $\tan\delta$ from the real (ε') and imaginary (ε'') components of the complex dielectric constant ($\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$) (Demir, 2025).

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (13)$$

Low $\tan\delta$ levels have been reported to give the material high dielectric stability and insulating qualities, but high $\tan\delta$ values are said to result in large energy losses during the dipole steering process (Kao, 2004; Barsoukov and Macdonald, 2005).

The $\tan\delta$ value of the CW test sample was almost constant (around ~ 2.5) across frequencies. This suggests steady orientation behavior and good dielectric qualities with minimal energy loss. The low-frequency negative $\tan\delta$ values (≈ -30) found in SW samples are thought to be artifacts caused by charge accumulation at the interface and electrode

polarization rather than inherent material characteristics. In these circumstances, (ϵ') may turn negative, leading to a negative $\tan\delta$ ratio. Heterogeneous wet dielectrics have also shown a similar anomalous dielectric dispersion, which may be a measurement artifact rather than a real negative loss characteristic (Barsoukov and Macdonald, 2005; Torgovnikov, 1993). Figure 2e also shows a pronounced $\tan\delta$ peak in SW samples at approximately 1–2 kHz, representing the loss maximum. The corresponding relaxation time ($\tau \approx 1/2\pi f_{\max}$) is approximately 10^{-4} s, consistent with interfacial polarization processes (Maxwell-Wagner-Sillars) in water-saturated wood. Conversely, CW samples exhibit low and nearly constant $\tan\delta$ values over the entire frequency range, suggesting poor dipolar relaxation and strong insulating properties (Jonscher, 1977; Sugimoto, et al., 2005).

At low frequencies (~ 1 kHz), the SW sample exhibits the characteristic $\tan\delta$ behavior, which is marked by an abrupt negative peak followed by a significant loss value that stays constant at higher frequencies. This indicates a significant loss of energy due to water-induced ions and interface polarization. However, the CW sample maintained low and consistent $\tan\delta$ values across the spectrum, indicating good insulation. Similar low-frequency loss peaks are observed for wet wood (Sahin and Ay, 2004; Sugimoto et al., 2005), whereas dry wood tends to show smaller and more uniform $\tan\delta$ values (Glass and Zelinka, 2010), which is consistent with the results of this study.

Equations (11) and (12) give the AC electrical conductivity (σ_{ac}) equations. AC electrical conductivity (σ_{ac}) is directly related to the ability of a material to conduct free energy lost under an electric field through current. In dielectric systems, (σ_{ac}) reflects the resistive energy component of the system and determines the extent to which free energy is retained or lost. High conductivity indicates that the system tends to lose energy, while low conductivity indicates its insulation and energy storing capacity (Macdonald, 1992; Demir, 2025; Barsoukov and Macdonald, 2005).

Figure 2f (σ_{ac} -F) plots show the AC electrical conductivity behavior of two different oriental beech test CW and SW samples in the frequency range of 100 Hz to 1 MHz. The conductivity values of the CW test sample versus frequency were quite low ($\sim 10^{-7} - 10^{-9}$ S). However, small sharp spikes were observed in some frequent regions. This indicates that the CW test sample is highly insulated, has limited segmental orientation, and stores energy mostly. The conduction mechanism is weak; the conversion of dipole orientations into free energy is limited. It is suitable for insulation, long-term energy storage, and low-loss capacitive applications. The SW test sample's conductivity value grew somewhat with frequency and stayed high ($\sim 10^{-4}$ S). A smooth logarithmic ascending trend was seen in the curve. This structure implies that the electrical transport mechanism of free ions is activated, and ion mobility is increased by water modification. The SW test sample has poor insulation qualities and is vulnerable to energy losses because of its high (ϵ'') fraction and increased frequency. This is in line with earlier studies that demonstrate how moisture dramatically raises dielectric losses in hardwoods via interfacial polarization and ionic conduction (Sahin and Ay, 2004; Sugimoto et al., 2005; Glass and Zelinka, 2010). The frequency dependence of σ_{ac} in SW samples follows Jonscher's universal power law $\sigma_{ac}(f) = \sigma_0 + Af^s$, where the exponent s reflects the conduction mechanism. According to our observations, σ_{ac} gradually rises with frequency in SW, which is in line with s values for ion-hopping conduction in wet wood systems that have been reported to be between 0.2 and 0.5 (Jonscher, 1977; Sugimoto et al., 2005). Steady-flow samples, on the other hand, show a practically constant σ_{ac} ($\sim 10^{-9}$ S/m), which corresponds to $s \approx 0$, suggesting an insulating characteristic with no frequency dependency.

In the present study, CW samples of oriental beech show low dielectric parameters ($\epsilon' \approx 10$, $\epsilon'' \approx 1$, $\tan\delta \approx 0.1$), while SW samples show much higher values ($\epsilon' \approx 10^3$, $\epsilon'' \approx 10^4$, $\tan\delta \approx 20$), indicating the presence of strong ionic polarization. Similar trends were observed in hardwoods: oak ($\epsilon' = 10^2$ – 10^3 , $\tan\delta = 5$ – 15) and birch ($\epsilon' \approx 10^2$, $\tan\delta = 4$ – 10) show higher losses than spruce, a softwood with lower ϵ' (10–50) and $\tan\delta$ (2–6) values (Pentoš et al., 2017; Sahin and Ay, 2004; Sugimoto et al., 2005). These comparisons verify that the dielectric behavior of moist eastern beech is more pronounced than that of softwoods, although it is still comparable to hardwoods.

The results of the dielectric properties (CW and SW) of oriental beech wood were compared with the values reported in the literature for oriental beech and other hardwood species. The capacitance (Cp), real (ϵ') and imaginary (ϵ'') dielectric constants, alternating current electrical conductivity (σ_{ac}), free energy component (G/ω), and dielectric loss factor ($\tan\delta$) are all displayed in Table 1, which summarizes the comparison. The dependability of the results and their applicability to previously published data are confirmed by the fact that the values obtained in this investigation are consistent with the ranges reported for hardwoods under comparable measuring conditions.

Table 1. Comparative dielectric parameters (Cp, ϵ' , ϵ'' , σ_{ac} , G/ω , $\tan\delta$) of oriental beech wood and literature values reported for other hardwood species.

Parameter	CW	SW	Literature values (hardwoods and moist wood)
Capacitance (Cp)	10^{-11} – 10^{-10} F	10^{-9} F	Similar order reported for moist hardwoods (Sugimoto et al., 2005)
ϵ' (real)	1–10	10^2 – 10^3	10 – 10^3 depending on MC and frequency (Pentoš et al., 2017)
ϵ'' (imag.)	0.1–1	10^2 – 10^3	Broad range 1 – 10^3 in moist wood (Sugimoto et al., 2005)
σ_{ac} (S/m)	10^{-9}	10^{-4}	10^{-8} – 10^{-3} (Sahin and Ay, 2004; Pentoš et al., 2017)
G/ω	10^{-8} – 10^{-7} F	10^{-4} F	Matches moisture-dependent interfacial polarization (Sugimoto et al., 2005)
$\tan\delta$	0.01–0.1	up to 10^2	Loss tangent strongly moisture dependent (Sahin and Ay, 2004)

4 Conclusion and Suggestions

According to the test results in our study

- Control samples showed continuous specific heat capacity and genuine dielectric permittivity in the low-frequency band when tested for thermal and dielectric stability. This indicates that the molecular structure of wood stuff is stable.
- The dielectric behavior of wood under humid circumstances is more complex than that of SW materials. Unusual phenomena, such as negative permittivity and negative $\tan\delta$, are observed in SW samples at low frequencies. The breakdown of the synchronous dipole orientation brought on by water-induced ion polarization and charge accumulation at the interface can account for these phenomena.
- Because of their high conductivity and potential for energy conversion, SW test samples can be employed in humidity sensors and green energy applications, while CW test samples can be used for insulating properties in high-frequency electronic systems.
- Oriental beaches were the only wood species that were investigated. Additionally, curve-fitting techniques (such as Cole-Cole or Jonscher analysis) were not used to predict aberrant behaviors like negative (ϵ') and $\tan\delta$ values; this should be considered in subsequent research. Similar techniques can be used to investigate the dielectric characteristics of various wood species. This could aid in the creation of conductive composites and insulation based on biomaterials. Our findings leave two questions unsolved: (i) What effects do longitudinal and tangential anisotropic grain orientations

have on the development of anomalous dielectric behavior? (ii) What effects do high humidity levels have on the change from stable to unstable dielectric responses? Future research addressing these issues will lead to a more thorough comprehension of dielectric mechanisms in wood materials.

Acknowledgement

I would like to thank Prof. Dr. Nevzat Çakicier for his help in providing the wooden material for this study and Assoc. Prof. Dr. Ahmet Demir for providing laboratory facilities for determining the measurements made on the experimental materials.

Author Contribution

Beytullah Bozali: Conceptualization, Determination of methodology, Conducting research, Conducting analyses, Data curation, Resources, Supervision, Validation, Visualization, Drafting the article, Writing, reviewing and editing the article.

Funding Statement

This study was not supported by any organization.

Conflict of Interest Statement

The author declares no conflict of interest.

References

- Akın, F., and Arıkan, O., (2020). Harmonik bileşenlerin katı yalıtkan malzemelerin dielektrik performansına etkisi, Elektrik Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, ELECO 2020, Bursa, Türkiye, 1-5.
- Aksoy, M., Önsal, G., and Uğurlu, O., (2023). Ni (II)Pc ve CdSeS/ZnS kuantum nokta katkılı sıvı kristal yapıların dielektrik sabitinin makine öğrenmesi algoritmaları ile tahmin edilmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(1), 513-523, DOI: [10.29130/dubited.1091499](https://doi.org/10.29130/dubited.1091499)
- Bal, B.C., Gündeş, Z., and Akçakaya, E., (2015). Kavak, kayın ve okalıptüs kaplamaları ile üretilen kontrplakların vida tutma direncinin araştırılması, *KSÜ Journal of Engineering Sciences*, 18(2), 77-83.
- Barsoukov, E., and Macdonald, J. R., (2005). Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications, 2nd ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience.
- Bashal, A. H., Khalafalla, M. A. H., and Ibrahim, R. M., (2025). Experimental and semiempirical quantum investigations of the effect of Cobalt addition on the dielectric properties of Nickle-Bentonite composite, *Journal of the Indian Chemical Society*, 102(101696), 1-7, DOI: [10.1016/j.jics.2025.101696](https://doi.org/10.1016/j.jics.2025.101696)
- Demir, A., (2025). Multispectral analysis of photosensitive perovskite-E7 liquid crystal composites: Correlating optical response with electrical properties, *Optical Materials*, 162, 1-10, DOI: [10.1016/j.optmat.2025.116878](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.116878)
- Demir, A., Musatat, A. B., and Kip, Ş. Z., (2024). Investigation of dielectric anisotropy and electrical modulus-impedance properties of PCBM/E7 composite for organic electronic devices applications, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 21(2), 72-79, DOI: [10.18466/cbayarfbe.1562667](https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.1562667)

- Duchow, K.J., and Gerhardt, R.A., (1996). Dielectric characterization of wood and wood infiltrated with ceramic precursors, *Materials Science & Engineering C-Biomimetic Materials Sensors and Systems*, 4: 125-131.
- El Mamı, M. M., (2024). Oltu taşının dielektrik özelliklerinin nem ve frekansa bağlı değişimlerinin incelenmesi, T.C. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ağustos-2024, Konya.
- Elloumi, I., Koubaa, A., Kharrat, W., Bradai, C., and Elloumi, A., (2021). Dielectric properties of wood-polymer composites: Effects of frequency, fiber nature, proportion, and chemical composition, *Journal of Composites Science*, 5(6), 141, DOI: [10.3390/jcs5060141](https://doi.org/10.3390/jcs5060141)
- Gencil, O., Musatat, A. B., Demir, A., Tozluoğlu, A., Tutuş, A., Kılı, U., Fidan, H., and Kosovalı Cavuş, F., (2024). Transforming industrial byproduct to eco-friendly functional material: Ground-granulated blast furnace slag reinforced paper for renewable energy storage, *Science of the Total Environment*, 954, 1-15, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.176616](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176616)
- Güntekin, E., and Uysal, M., (2024). Experimental and numerical analysis of the bending behavior of beech (*Fagus orientalis* L.) plywood-reinforced particleboard and fiberboard panels, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 7(1), 26-37, DOI: [10.33725/mamad.1464366](https://doi.org/10.33725/mamad.1464366)
- Glass, S. V., and Zelinka, S. L., (2010). *Moisture relations and physical properties of wood*. In *Wood handbook: Wood as an engineering material* (4-1-4-19). USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Husein, I., Agustina, A., and Khabibi, J., (2014). Electrical properties of Indonesian hardwood case study: *Acacia mangium*, *Swietenia macrophylla* and *Maesopsis eminii*, *Wood Research*, 59(4), 695-704.
- İbrahimoglu, E., Demir, A., Çalışkan, F., and Tatlı, Z., (2024). The dielectric characteristics of spray deposited α -Si₃N₄:ZnO thin films: The nitride effect on frequency-dependent capacitance and conductance profiles, *Solid State Sciences*, 158, 1-10, DOI: [10.1016/j.solidstatesciences.2024.107754](https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2024.107754)
- James, W. L., (1975). Dielectric properties of wood and hardboard: Variation with temperature, frequency, Moisture Content, and Grain Orientation Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Joshi, S., Shukla, A., Kumar, N., and Choudhary, R. N. P., (2025). Investigating the impact of La and Ti co-doping on the structural, morphological, dielectric, electrical, and magnetic properties of bismuth ferrite, *Journal of Alloys and Compounds*, 1026(180383), 1-11, DOI: [10.1016/j.jallcom.2025.180383](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180383)
- Jonscher, A. K., (1977). The ‘universal’ dielectric response. *Nature*, 267, 673-679.
- Kao, K.C., (2004). Dielectric phenomena in solids, With Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes, In 1st ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Academic Press.
- Kara, H., Özder, C., Keskin, H., Atar, M., and Karabal, B. N., (2024). Effect of paints applied to wood and wood-based boards on light intensity in combustion, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 7(2), 172-187, DOI: [10.33725/mamad.1563749](https://doi.org/10.33725/mamad.1563749)

- Macdonald, J. R., (1992). Impedance spectroscopy, *Annals of Biomedical Engineerin*, 20, 289-305.
- Markham, T. R., (1964). Dielectric constant and loss data. In *Polymer Handbook* (pp. III-1–III-31). Wiley.
- Notingher, P., Notingher, P. V., Nițu, C., and Georgescu, D., (2003). Dielectric properties of wood–polymer composites as a function of frequency and moisture. *Polymer Testing*, 22(5), 555–562.
- Ondo-Ndong, R., Essone-Obame, H., Moussambi, Z. H., and Koumba, N., (2018). Capacitive properties of zinc oxide thin films by radiofrequency magnetron sputtering, *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 12(4), 309-317, DOI: [10.1007/s40094-018-0309-9](https://doi.org/10.1007/s40094-018-0309-9)
- Otten, K. A., Brischke, C., and Meyer, C., (2017). Material moisture content of wood and cement mortars – Electrical resistance-based measurements in the high ohmic range, *Construction and Building Materials*, 153, 640-646, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.07.090](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.090)
- Pentoś, K., Łuczycka, D., and Wysoczański, T., (2017). Dielectric properties of selected wood species in Poland. *Wood Research*, 62(5), 727–736
- Porebska, R., Matykiewicz, D., Barczewski, M., and Andrzejewski, J., (2021). Dielectric properties of wood fiber reinforced polyethylene composites across frequency. *Journal of Composites Science*, 5(6), 141.
- Ramazanoğlu, D., Subaşı, A., Musatat, A. B., Demir, A., Subaşı, S., and Maraşlı, M., (2025). Multifunctional SnO₂-@ doped glass fiber-reinforced concrete: Improved microstructure, mechanical, dielectric, and energy storage characteristics, *Construction and Building Materials*, 476(141231), 1-15, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2025.141231](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141231)
- Sabbah, H., Fadil, Z., El Fdil, R., Raorane, C. J., Rosaiah, P., AlSayyari, A. A., Fattah, A. A., and Mahmoud, K. H., (2025). Investigating dielectric properties and hysteresis cycles in X3 Borophene: A Monte Carlo study, *Solid State Communications*, 400(115913), 1-8, DOI: [10.1016/j.ssc.2025.115913](https://doi.org/10.1016/j.ssc.2025.115913)
- Sahin, H., and Ay, N., (2004). Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies, *Journal of Wood Science*, 50(5), 375–380, DOI: [10.1007/s10086-003-0575-1](https://doi.org/10.1007/s10086-003-0575-1)
- Sugimoto, H., Takazawa, R., and Norimoto, M., (2005). Dielectric relaxation due to heterogeneous structure in moist Wood, *The Japan Wood Research Society*, 51, 549-553, DOI: [10.1007/s10086-004-0688-1](https://doi.org/10.1007/s10086-004-0688-1)
- Tinga, W., and Nelson, S., (1973). Dielectric properties of materials for microwave processing-tabulated, *Journal of Microwave Power*, 8(1), 23-65, DOI: [10.1080/00222739.1973.11689017](https://doi.org/10.1080/00222739.1973.11689017)
- Tiwary, K. P., Mishra, R. K., Nikhil, K., Choubey, S. K., Kumar, S., and Sharma, K., (2025). Investigation of structural, morphological, optical and dielectric properties of Ni²⁺ modified CdTe nanoparticles, *Physica B: Condensed Matter*, 712(417311), 1-10, DOI: [10.1016/j.physb.2025.417311](https://doi.org/10.1016/j.physb.2025.417311)
- Torkaman, J., Aghajankordi, M., and Rangavar, H., (2022). Modification of the beech (*Fagus orientalis*) wood properties via electricity. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 13(1), 27–35

- Torgovnikov, G. I., (1993). *Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials*. Springer, DOI: [10.1007/978-3-642-77453-9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-77453-9)
- Vaydoğan, K. G., (2017). *Isıl işlem görmüş bazı ağaç malzemelerin farklı rutubet şartlarındaki ısı iletkenlik ve dielektrik özelliklerinin belirlenmesi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Orman Endüstri Mühendisliği, Yüksel Lisans Tezi, Karabük.
- Vos, M., and Grande, P. L., (2025). Dielectric functions, their properties and their relation to observables: Investigations using the Chapidif program for the case of aluminum, *Computer Physics Communications*, 314(109657), 1-20, DOI: [10.1016/j.cpc.2025.109657](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2025.109657)
- Von Hippel, A. R., (1954). *Dielectric Materials and Applications*. MIT Press.
- Wei, L., Liu, Q. X., Zhu, B., Liu, W. J., Ding, S. J., Lu, H. L., Jiang, A., and Zhang, D. W., (2016). Low-cost and high-productivity three dimensional nanocapacitors based on stand-up ZnO nanowires for energy storage, *Nanoscale Research Letters*, 11(213), 1-9, DOI: [10.1186/s11671-016-1429-2](https://doi.org/10.1186/s11671-016-1429-2)
- Yalınkılıç, A.C., Aksoy, E., Atar, M., and Keskin, H., (2020). Renk açma ve vernikleme işleminin bazı ağaç malzemelerin alev kaynaklı yanma özelliklerine etkileri, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 61-70, DOI: [10.33725/mamad.750801](https://doi.org/10.33725/mamad.750801)



Tarihi bir caminin ahşap tavan elemanlarında malzeme analizi: ağaç türü, böcek hasarı ve higroskopik davranış

Elif Topaloğlu^{1*}, Murat Öztürk², Derya Ustaömer³, Mesut Yalçın⁴

ÖZ: Bu çalışmada, Trabzon ilinin Akçaabat ilçesinde bulunan tarihi Demirtaş-Derecik-Karaman Merkez Camisine ait atık eski ahşap tavan elemanlarının odun türü, biyolojik tahribatı ve higroskopik özellikleri araştırılmıştır. Eski (özgün) örnekler ve yeni (kontrol) örnekler olmak üzere iki örnek grubu oluşturulmuştur. Yapılan mikroskopik analizler sonucunda eski ahşap tavan elemanlarının Doğu ladini (*Picea orientalis* L.) türüne ait olduğu belirlenmiştir. Eski örneklerin diri odun kısmında tahribata yol açan böcek türünün *Anobium punctatum* olduğu tespit edilmiş ve ergin böceklerle ait özellikler belirlenmiştir. Eski ve yeni ahşap tavan örneklerinin teğet, radyal ve boyuna yöndeki genişleme oranları ilgili standartlara göre belirlenmiş olup eski ahşap tavan örneklerinin bahsi geçen üç yöndeki genişleme oranları yeni örneklerle kıyasla daha düşük bulunmuştur. Higroskopik davranışı anlamak için gerçekleştirilen iki haftalık suda bekletme süresi boyunca eski ve yeni örneklerin higroskopik davranışlarının genel olarak benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, tarihi yapıların korunması açısından kullanılacak odun türünün doğru belirlenmesinin ve malzemenin higroskopik davranışının dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Ahşap tavan, odun anatomisi, böcek hasarı, higroskopik davranış

Material analysis of wooden ceiling elements of a historical mosque: wood species, insect damage, and hygroscopic behaviour

ABSTRACT: In this study, the wood specie, biological degradation, and hygroscopic properties of waste old wooden ceiling elements from the historic Demirtaş-Derecik-Karaman Central Mosque in the Akçaabat district of Trabzon province were investigated. Two sample groups were created: old (original) and new (control) samples. Microscopic analyses determined that the old wooden ceiling elements belonged to the species Oriental spruce (*Picea orientalis* L.). The insect species that caused damage to the sapwood of the old samples was identified as *Anobium punctatum*, and the characteristics of the adult insects were determined. The swelling rates of the old and new wooden ceiling samples in the tangential, radial, and longitudinal directions were determined according to relevant standards, and the swelling rates of the old wooden ceiling samples in these three directions were found to be lower than those of the new samples. During a two-week water immersion period to understand hygroscopic behaviour, the hygroscopic behaviour of the old and new samples was generally observed to be similar. The results of the study emphasize the importance of correctly determining the wood specie to be used and taking into account the hygroscopic behaviour of the material in terms of conserving historical buildings.

Keywords: Wooden ceiling, wood anatomy, insect damage, hygroscopic behaviour

Makale tarihçesi: Geliş:06.08.2025, Düzeltme: 24.09.2025, Kabul:08.10.2025, Yayınlanma:26.11.2025, * elif.topaloglu@giresun.edu.tr

¹Giresun Üniversitesi, Giresun Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Giresun/Türkiye

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Trabzon/Türkiye

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Trabzon/Türkiye

⁴Düzce Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye

Atıf: Topaloğlu, E., Öztürk, M., Ustaömer, D. ve Yalçın, M., (2025). Tarihi bir caminin ahşap tavan elemanlarında malzeme analizi: Ağaç türü, böcek hasarı ve higroskopik davranış, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 8 (2), 281-294, DOI: [10.33725/mamad.1759709](https://doi.org/10.33725/mamad.1759709)

1. Giriş

Tarihi yapılar, inşa edildikleri döneme ait mimari unsurları, mühendislik bilgilerini, kullanılan yapı malzemelerini ve kültürel özellikleri günümüze taşıyan kalıcı kültürel miraslardır. Anadolu coğrafyasında, Osmanlı ve Selçuklu dönemlerinden günümüze ulaşan pek çok tarihi cami bulunmaktadır. Bu camiler, taş ve ahşap yapı teknikleriyle inşa edilmiş olup yüzyıllardır ayakta kalmayı başarmış önemli örneklerdir (Özodabaş, 2023). Karadeniz Bölgesi'nde sıkça karşılaşılan camilerde, hem dış cephelerde hem de iç mekânın taşıyıcı ve süsleyici unsurlarında ahşap malzeme yoğun bir şekilde tercih edilmiştir (Aydın, 2017). Ahşap malzeme, bu bölgenin kırsal camilerinde, dış duvar yapısı dışında; genellikle mahfil katı, tavan, döşeme, çatı, kapı ve pencere kanatları gibi çeşitli mimari unsurlarda; dikme ve kiriş gibi taşıyıcı elemanlarla birlikte iç mekânda yer alan mihrap, minber ve vaaz kürsüsü gibi öğelerde kullanılmıştır (Zorlu, 2017).

Araştırma konusu olan Demirtaş-Derecik-Karaman Merkez Cami Trabzon ilinin Akçaabat İlçesi, Derecik Beldesi, Karaman Mahallesi'nde bulunmakta olup Sera Deresi Vadisi'nin güneyinde dere yatağının doğusunda yer almaktadır. Cami üzerinde inşa tarihini gösteren bir kitabe bulunmamakla birlikte mimari özellikleri açısından 20. yüzyıla tarihlendirilmektedir (Kazaz, 2016; Sarı, 2021). Şekil 1'de görüldüğü üzere caminin tavanı gizli kubbeli ahşap tavanlıdır (Kazaz, 2016).



Şekil 1. Demirtaş-Derecik-Karaman Merkez Cami ahşap tavanı

Anadolu'da çok eski dönemlerden bu yana tercih edilen ahşap tavanlar, ekonomik açıdan oldukça uygun bir örtü çözümüdür. Genellikle kare ya da kareye yakın dikdörtgen planlı mekânlarda tercih edilen ahşap tavan sistemi, zaman zaman dairesel alanlarda da kullanılmıştır. Ahşap tavan, mekânı taşıyıcılarla bölmeden örtme olanağı sunarak özellikle geniş açıklıklarda işlevsel bir çözüm sağlamaktadır (Korkmaz, 2016). Ahşap malzeme; doğal

yapısı, estetik çeşitliliği, kolay şekillendirilebilir ve sürdürülebilir oluşu, ses ve ısı yalıtımındaki etkinliği, paslanmaya karşı dayanıklılığı ve bağlantı parçalarıyla yüksek dayanım göstermesi gibi sebeplerle geçmişten günümüze çatı dahil yapı iskeletlerinin çeşitli bölümlerinde yaygın şekilde kullanılmıştır (Bozkurt, 2013; Güler ve Tor, 2023). Nem ve aşınmaya karşı dirençli, farklı renk ve desen özelliklerine sahip ağaç cinsleri, iç mekanlarda yatay yüzeylerde kullanılacak ahşap malzemeler olarak tercih edilmektedir. Ayrıca bu ağaç cinsleri, farklı şekillerde birleştirilebilir ve çeşitli desenlerde döşenebilir (Hanedar, 2021). Geleneksel Türk mimarisinde gerek iğne yapraklı gerekse yapraklı ağaç türlerinin yapıların farklı yerlerinde kullanıldığı bilinmektedir. Tayla (2007) tarafından hazırlanan “Geleneksel Türk Mimarisinde Yapı Sistem ve Elemanları I” adlı eserde özellikle iğne yapraklı ağaçlardan Sarıçamın geleneksel ev yapımının her bölümünde geniş bir şekilde kullanıldığı, Doğu ladininin özellikle dekorasyon ve iç doğrama yapımında kullanıldığı, Göknaarın iç doğrama, ahşap tavan ve döşeme gibi yapı elemanlarında kullanıldığı; yapraklı ağaçlardan özellikle Cevizin geleneksel evlerde çift katlı ve geçme küçük parçacıklardan yapılan tavanlarda ve çıtalarla yapılan boyasız tavanlarda kullanıldığı belirtilmektedir. Ahşap yapılarda özellikle taban ve tavan döşemeleri, giriş, lambri, kapı ve merdiven gibi yapı elemanları, mobilya ve sepet gibi eşyalar; cami, müze ve kiliselerdeki ahşap sanat eserleri ve müzik aletleri, ahşabı bir gıda maddesi olarak kullanan böcekler tarafından önemli derecede tahrip edilmektedir. Mobilya böcekleri (*Anobium punctatum*), ev teke böcekleri (*Hylotrupes bajulus*), parke böcekleri (*Lyctus spp*) ve ölüm saati böcekleri (*Xestobium rufovillosum*) en fazla rastlanan böceklerdir (Kartal, 2016).

Ahşap malzeme, bulunduğu bölgenin iklimsel koşullarına bağlı olarak çevresindeki hava sıcaklığı ve bağıl nemdeki günlük ya da mevsimsel değişimlerden etkilenmektedir. Bu durum da ahşabın içindeki nem oranının değişmesine yol açmaktadır. Ahşap, pek çok doğal malzeme gibi bulunduğu ortamın koşullarına bağlı olarak zamanla çeşitli bozulmalara maruz kalabilmektedir. Sıcaklık ve bağıl nem gibi iç ortam şartları ahşabın hizmet ömrünü etkileyen faktörler arasında yer almaktadır (Kartal ve ark., 2024). Ortamın higro-termal koşulları değiştiğinde ahşap yeni bir denge rutubet içeriğine ulaşma eğilimindedir. Suyu emer veya desorbe eder. Bu higroskopik davranış, malzemenin yapısında iç gerilimlere, deformasyonlara, ahşap desteklerin çatlamasına ve boyalı katmanlarda bozulmalara yol açabilmektedir. Zira bu durumlar, muhtemelen ahşap eserlerin korunmasındaki sorunların ana kaynağıdır (Allegretti ve Raffaelli, 2007). Literatürde yaşlanmış ahşabın higroskopik davranışlarına ilişkin bilgiler oldukça sınırlıdır. Kohara ve Okamoto (1955), yaşları 240 ile 1300 yıl arasında değişen iki eski Japon odun türünde higroskopisitede bir azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Esteban ve ark., (2006), 205 yıllık yaşlanmış sarıçam odununa ait sorpsiyon eğrilerinin yeni oduna göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Gereke ve ark., (2011), doğal olarak yaşlanmış ve günümüz odun örneklerinden oluşan üç ağaç türünün rutubet davranışını araştırdıkları çalışmalarında yaşlanmanın ahşabın nem tepkisi ve boyutsal değişimi üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı sonucuna varmışlardır. Topaloğlu (2023), çalışmasında sarıçamdan imal edilmiş eski pencere denizliklerinden alınan örnekler üzerinde gerçekleştirdiği su alma deneyi sonucunda, 2. saatten 312. saate kadar genel olarak su alma oranının zamanla arttığını, ancak 120. saatte bu artışın gerçekleşmediğini belirlemiştir.

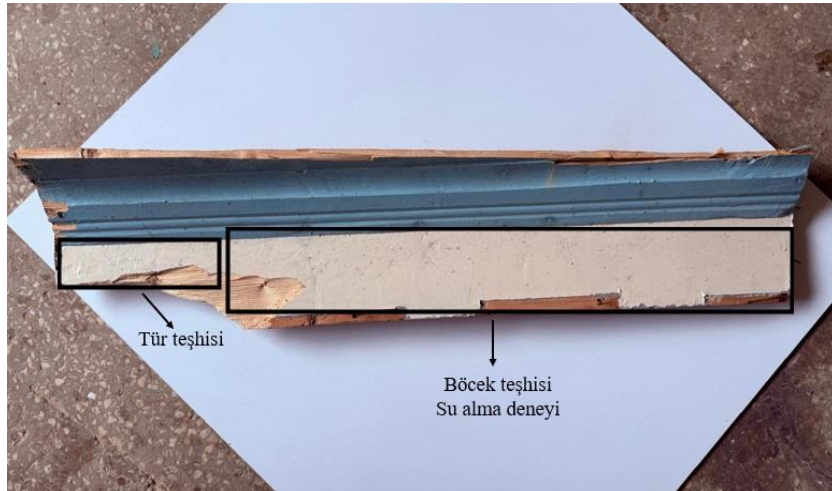
Ahşabın doğal yapısı, estetik görüntüsü, ısı ve ses yalıtımı gibi fonksiyonel özellikleri cami iç mekanlarını farklılaştıran önemli unsurlardır. Fakat zamanla çevresel faktörlerin etkisi ve kullanım koşulları nedeniyle ahşap malzemenin bozulması kaçınılmaz olmaktadır. Geleneksel yapı malzemelerinin malzeme özellikleri açısından değerlendirilmesi ve uygun malzeme seçimi restorasyon sürecinin sağlıklı bir şekilde yürütülmesi için büyük öneme sahiptir. Bu

çalışmanın amacı; cami iç mekânında kullanılan ahşap tavan elemanlarının odun türü teşhisini yaparak bu elemanların su ile ilişkisi ve böcek kaynaklı biyolojik bozulma durumlarını değerlendirerek caminin sürdürülebilir restorasyonuna katkı sağlayacak bilimsel veriler elde etmektir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Materyal

Araştırma kapsamında kullanılan materyaller, Demirtaş-Derecik-Karaman Merkez Caminin restorasyona hazırlık aşamasında sökülen ve yeniden kullanım için uygun olmayan atık özgün ahşap tavan elemanlarıdır (Şekil 2). Çıplak gözle yapılan gözlemler sonucunda ahşap tavan elemanları üzerinde yağlı boya tabakasının olduğu, diri odunda böcek deliklerinin bulunduğu, çatlak ve çürüme gibi bozulmaların olmadığı görülmüştür. Çalışma kapsamında; eski örnekler (yağlı boyalı-rijinal) ve yeni örnekler (kontrol örneği) olmak üzere iki test grubu oluşturulmuştur. Yeni örnekler, eski örneklerle karşılaştırma yapmak amacıyla Trabzon'dan temin edilen Doğu ladini örnekleridir. Şekil 2'de özgün ahşap tavan elemanı üzerinde odun türü teşhisi, böcek zararının tespiti ve su alma deneyi için yapılan kesim planı belirtilmiştir.



Şekil 2. Özgün ahşap tavan elemanı ve kesim planı

2.2 Metot

2.2.1 Odun anatomisi ve tür teşhisi

KTÜ Orman Fakültesi, Odun Anatomisi Laboratuvarına ulaştırılan ahşap numunelerin zarar görmemiş kısımlarından $1 \times 1 \times 1$ cm boyutlarında kübik örnekler hazırlanmıştır. Örneklerdeki hava boşluklarının giderilmesi ve yumuşatılması, kesit alma sırasında hücre yapısının zarar görmemesi amacıyla bu parçalar saf su içerisinde dibe çökene kadar kaynatılmıştır. Ardından, her örnek, hacimce eşit oranlarda hazırlanmış alkol, gliserin ve saf su karışımı içerisinde muhafaza edilmiştir. Bu çözeltiye biyolojik bozulmaların önüne geçmek amacıyla uygun miktarda fenik asit eklenmiştir (Merev, 1998; Gerçek, 2011).

Kesit almaya uygun hale getirilen örneklerden, Reichert model kızaklı mikrotom kullanılarak yaklaşık 15-20 mikrometre kalınlığında enine (transversal), boyuna ışımsal (radyal) ve boyuna teğetsel (tanjansiyel) yönlerde mikroskobik kesitler hazırlanmıştır. Kesitler, yapısal pigmentlerin uzaklaştırılması amacıyla 5-10 dakika boyunca sodyum

hipoklorit çözeltisinde bekletilmiş ve ardından saf su ile durulanmıştır. Boyama öncesinde ortam pH'sinin nötrlenmesi için kesitlere 1-2 damla asetik asit uygulanmış, 1-2 dakika bekletildikten sonra tekrar saf su ile yıkanmıştır. Bu ön işlemlerin ardından kesitler, %0.5 oranında hazırlanmış %50'lik safranin çözeltisinde 5 dakika süreyle boyanmıştır. Fazla boyanın uzaklaştırılması amacıyla kesitler sırasıyla %70 ve %99'luk etanol serilerinden geçirilmiştir. Son aşamada, standart kalıcı preparat hazırlama protokolü izlenerek kesitler gliserin-jelatin ortamına alınmış ve mikroskopik incelemeye uygun daimi preparatlar elde edilmiştir (Ives, 2001).

Hazırlanan daimi preparatlara ait mikroskopik görüntüler, Olympus BX50 model araştırma mikroskobuna entegre dijital kamera aracılığıyla kaydedilmiş ve görsel analiz işlemleri BAB Bs200ProPlus Görüntü İşleme ve Analiz Yazılımı (Bab, 2000) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tür teşhisinde, IAWA Committee tarafından oluşturulan mikroskopik odun özelliklerine ilişkin standart tanımlamalar esas alınmış (Richter ve ark., 2004) ve Türkiye'de doğal olarak yayılış gösteren Gymnospermae taksonlarına ait odun atlası kullanılarak anatomik karşılaştırmalar yapılmıştır (Gerçek, 2011).

2.2.2 Böcek zararının tespiti

Eski ahşap tavan elemanlarından alınan örneklerde böcek zararı oldukça şiddetli olup tahribatin hangi böcek türünden kaynaklandığının tespiti amacıyla tür teşhisi yapılmak üzere ahşap örnekler, Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Odun Koruma Laboratuvarında Prof. Dr. Mesut Yalçın tarafından incelenmiştir. Bu amaçla böcek çıkış deliklerinin fazla olduğu ahşap elemanlardan örnekler alınmıştır. Laboratuvar ortamında Soif marka stereo mikroskobu yardımı ile örneklerdeki çıkış delikleri; şekli, büyüklüğü (çapı) ve dağılımı incelenmiştir. Örnekler parçalanarak böcek yeniği tozlardaki dışkıların; rengi, şekli, dokusu ve büyüklüğü incelenmiştir. Ayrıca döküntüler içerisinde ergin böcek araştırması yapıp elde edilen ergin böceklerin vücut yapıları, büyüklüğü, rengi vb. incelenmiştir. Elde edilen veriler teşhis anahtarlarında değerlendirilerek tür teşhisi yapılmıştır (Borror ve ark., 1989; Çanakçıoğlu ve Mol, 1998; Kaygın, 2007; Noldt ve Noldt, 2013; Elgharrawy ve Abied, 2019).

2.2.3 Genişleme anizotropisi ve su alma oranı

Su alma oranını belirlemek için $20 \times 20 \times 30$ mm (kalınlık $\times$ genişlik $\times$ uzunluk) boyutlarında kesilerek hazırlanan deney örnekleri 20 ± 2 °C sıcaklık ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem koşullarında iklimlendirme odasında hava kurusu hale gelinceye kadar bekletilmiştir. Hava kurusu haldeki örnekler, kurutma etüvünde 103 ± 2 °C sıcaklıkta tam kuru ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Her bir grup için 30 adet test örneği kullanılmıştır. Tam kuru hale getirilmiş test örnekleri saf su ile doldurulmuş beher içerisine yerleştirilmiştir. Test örnekleri sırasıyla her 24 saatte bir beherden çıkarılmış ve yüzeylerindeki fazla su alınarak uzaklaştırılmıştır. Sudan çıkarılan örneklerin ağırlıkları ve boyutları ölçüldükten sonra tekrar suyu yenilenmiş beher içerisine yerleştirilmiştir. Bu işlem toplam 14 gün boyunca sürdürülmüştür. Her su değişimi sonrasında su alma oranı (SAO) Eşitlik 1 ve örnek boyutlarındaki değişimler yıllık halkalara teğet yönde (t), yıllık halkalara radyal yönde (r) ve lifler boyunca (l) olmak üzere ISO 13061-15 (2017) standardı esas alınarak hesaplanmıştır.

$$SAO = [(A_2 - A_1) / A_1] \times 100 \quad (1)$$

SAO = Su alma oranı (%)

A_2 = Suda bekletilen örneğin ağırlığı (g)

A_1 = Örneğin tam kuru ağırlığı (g)

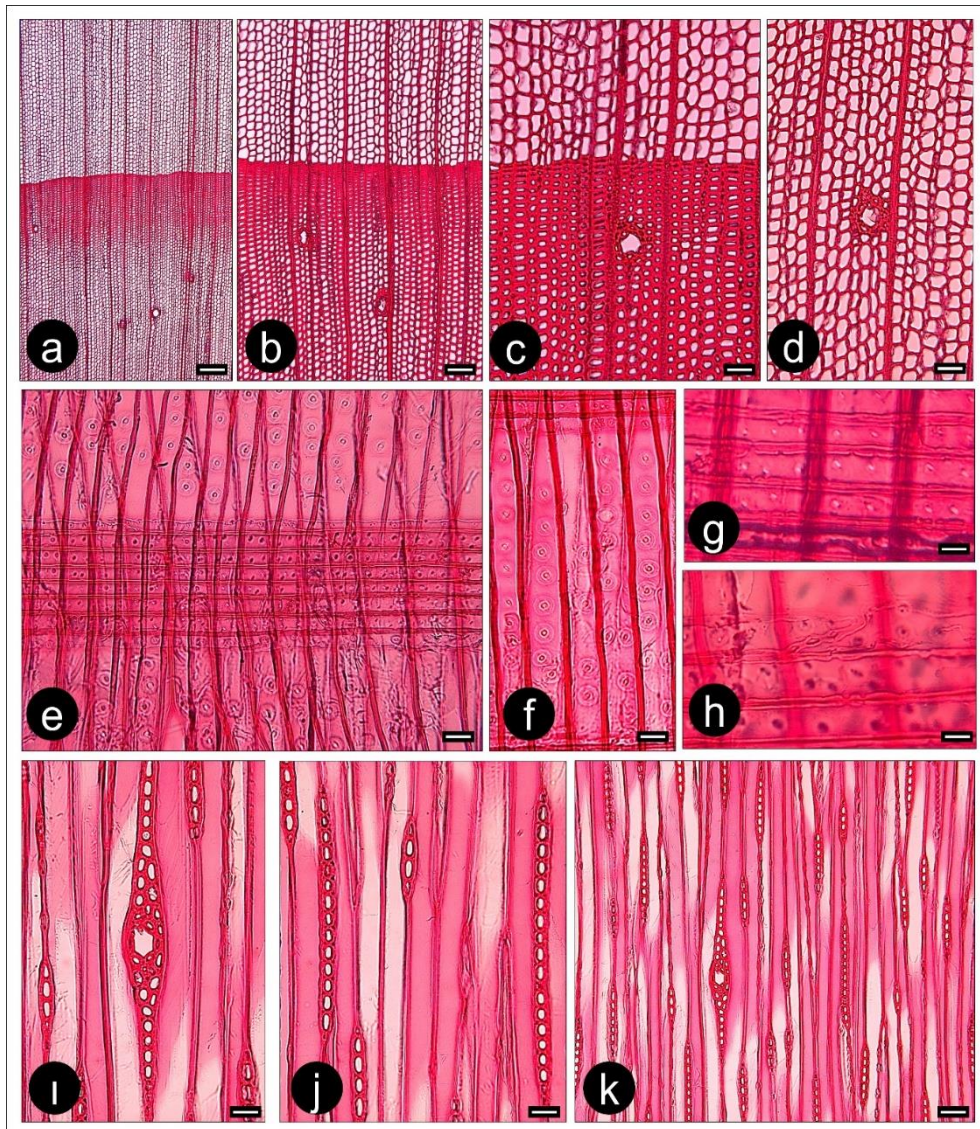
2.2.4 İstatistik hesaplarının yapılması

İstatistik hesaplamaları SPSS Statistics 27 programı kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen verilere ait aritmetik ortalama ve standart sapma değerleri belirlenmiştir. Eski ve yeni örnek grupları arasında anlamlı farklar olup olmadığını belirlemek için Independent-Samples T testi uygulanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Odun anatomisi özellikleri

Mikroskobik incelemeler sonucunda, tarihi caminin tavanındaki eski ahşap elemanlarının Doğu ladini (*Picea orientalis* L.) türüne ait olduğu belirlenmiştir. Şekil 3'te Doğu ladini (*Picea orientalis* L.) türüne ait mikro fotoğraflar gösterilmiştir.



Şekil 3. Doğu ladini (*Picea orientalis* L.) odununun enine (a, b, c, d), radyal (e, f, g, h) ve teğet (i, j, k) kesitlerine ait mikro fotoğraflar. Ölçek çubuğu a=250 µm; b=100 µm; c,d,k=50 µm; e, f, i, j=25 µm; g,h=10 µm

Doğu ladini odununun yıllık halka sınırları belirgin olup ilkbahar odunundan yaz odununa geçiş yavaştır (Şekil 3a-b). İlkbahar odunu traheidleri ince çeperli ve geniş lümenlidir (Şekil 3d). Yaz odunu traheidleri ise kalın çeperlidir ve daha küçük çaplara sahiptir (Şekil 3d). Boyuna reçine kanalları genellikle yaz odunu içerisinde yer almakta olup reçine kanalını çevreleyen 5-10 arasında değişen sayıdaki epitel hücreler kalın çeperlidir (Şekil 3b-c). İlkbahar odunu traheidleri radyal çeperlerinde çoğunlukla tek sıralı geçitler görülmekle birlikte çok geniş traheidlerde nadiren iki sıralı geçitler de gözlemlenmiştir (Şekil 3e-f).

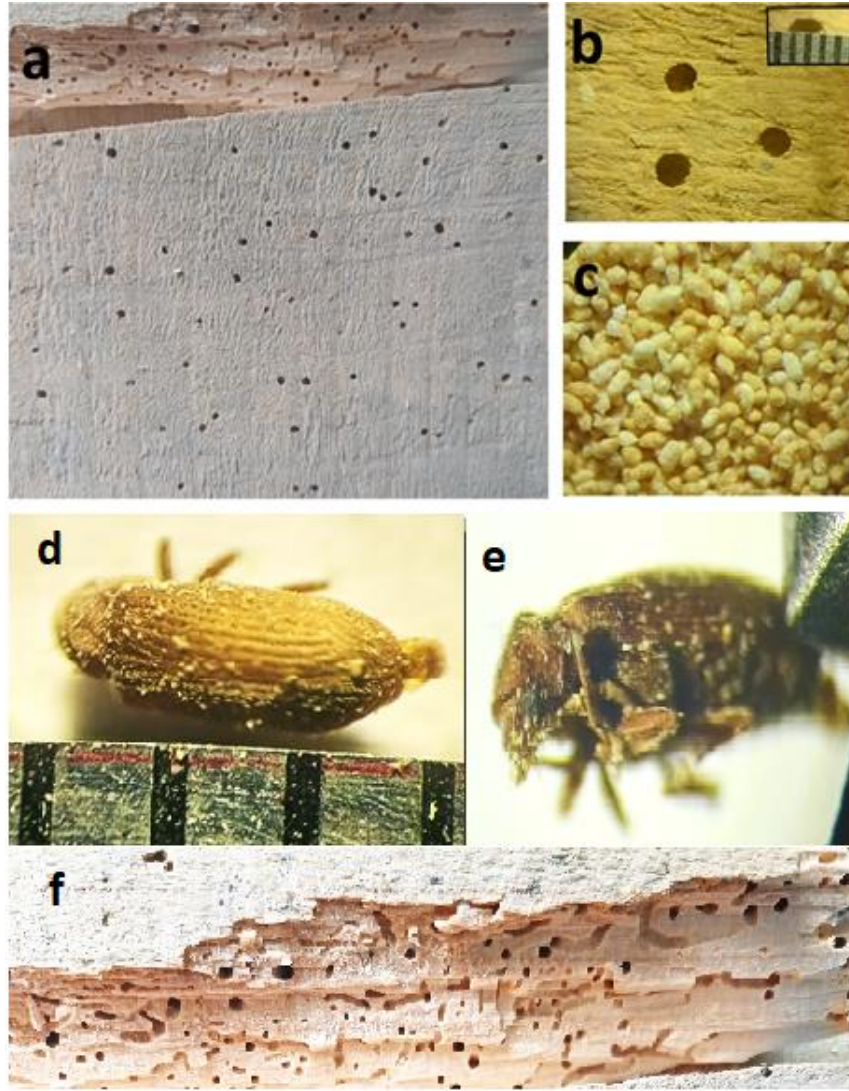
Öz ışınları genellikle tek sıralı dizilim gösterir. Özışınlarının maksimal yüksekliği yaklaşık 29 hücreye kadar ulaşmaktadır. Reçine kanalı içeren öz ışınlarının orta bölümlerinde hücre dizilimi sık olup yapıları heterojen karakterdedir. Reçine kanalını çevreleyen 5-10 arasında değişen sayıdaki epitel hücreler bulunmaktadır (Şekil 3i-j-k) (Sudo, 1968). Bu öz ışınlarının alt ve üst sınırlarında bir ya da iki sıralı enine traheid yer almakta olup bu traheidlerin çeperleri çoğunlukla ince, bazen de düzgün ya da dalgalı görünümde olabilir (Şekil 3e-h). Öz ışını paranzim hücreleri ile boyuna traheidlerin karşılaşma yerlerinde 1-5 adet piceoid tipte geçit bulunmaktadır (Şekil 3g).

Doğu ladini, Türkiye ve Kafkasya’da genel olarak yayılış göstermekle birlikte Türkiye’de Ordu, Giresun, Trabzon, Rize ve Artvin’in dağlık kesimlerinde doğal olarak yayılış yapmaktadır. Doğal yayılış ortamında en fazla 60 m. boy yapabilen herdem yeşil ağaçlardır (Akkemik, 2020). Yapı malzemesi olarak, kapı ve pencere doğramalarında, gemi direği ve maden direği yapımında, yonga ve lif levha endüstrisinde, müzik aletleri yapımında kullanılmaktadır (Bozkurt ve Erdin, 2011). Doğu ladini ormanlarının Doğu Karadeniz Bölgesi’nde bol bulunur olması; odununun düzgün lifli, yumuşak ve orta ağırlıkta olması; ağırlığına göre yüksek direnç özellikleri göstermesi ve ahşap işçiliği açısından kolay işlenebilir özellikte olması bu türün geleneksel Doğu Karadeniz mimarisinde tercih edilmesinin temel nedenleri arasında yer almaktadır.

3.2 Böcek zararı

Eski tavan örneklerinde biyolojik tahribata sebep olan böcek türünün teşhisine ait fotoğraflar Şekil 4’te belirtilmiştir. Böcek zararı görmüş ahşap eleman örnekleri ön incelemede, kabuksuz yumuşak ağaç türü olup rutubet oranı %20’nin altında olduğu tespit edilmiştir. Odun örnekleri yüzeysel incelendiğinde, ergin böcek çıkış deliklerinin dairesel ve delik çaplarının yaklaşık 1-1.5 mm çapında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4a-b). Odun örnekleri parçalanıp ergin, larva veya böcek dışkısı taraması yapılmıştır. Böcek dışkılarının, açık renkli, silindirik ve topak şeklinde olduğu ve dışkı boyunun yaklaşık 0.5 mm boyutunda olduğu belirlenmiştir (Şekil 4c). Ayrıca galerilerde ölü olarak tespit edilen ergin böceklerin ~3 mm boyunda, silindirik, protonumun kaidesinin elitradan biraz geniş, prothoraks koyu bir şekilde baştan itibaren sarımsı tüylerle örtülü olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4d). Antenler toplam vücut uzunluğunun yaklaşık üçte biri uzunluğundadır ve üç terminal segmentten oluşup hafifçe yassı olduğu tespit edilmiştir. Tüm bu inceleme ve teşhis anahtarları yardımıyla değerlendirmeler neticesinde ahşap yapı elemanında zarar yapan böcek türünün; Insecta sınıfı, Anobiidae familyası, Coleoptera takımı, Anobium cinsine ait *Anobium punctatum* türü olduğu tespit edilmiştir. *Anobium punctatum* Dünyada geniş bir yayılış alanına sahip olup Avrupa, Asya ve Kuzey Amerika’nın ılıman bölgelerinde yerli tür olarak bulunur. Sonradan Güney Afrika, Avustralya’da yayılış göstermiştir. Türkiye’de de geniş yayılış alanına sahip olup başta, İstanbul, Ankara, Doğu Karadeniz ve Doğu Anadolu Bölgesi’nde yayılış göstermektedir. Daha çok yumuşak ağaç türlerini tercih eden bu tür, iğne yapraklı türlerde diri odunu tercih ederken yapraklı türlerde öz odununu tercih etmektedir.

Uygun koşullar altında en şiddetli tahribat yaptığı türlerin başında, çam, ladin ve dişbudak gelmektedir (Kaygın, 2007).



Şekil 4. Deformasyona sebep olan böcek türünün teşhisi

a) Böcek tahribatına uğramış ahşap numune örneği, **b)** Ergin böcek çıkış deliği (Ölçekteki iki çizgi arası 1/2mm'dir), **c)** Böcek dışkısı, **d-e)** Ergin böcek ve farklı açıdan görünümü (Ölçekteki iki çizgi arası 1 mm'dir), **f)** Larva tünelleri

3.3 Genişleme anizotropisi ve su alma oranı

Higroskopik malzemeler için önemli özelliklerden olan nem alma (sorpsiyon) davranışı, söz konusu malzemelerden üretilen elemanların kullanım süresince boyutsal stabilitesini ve o malzemenin birçok kullanım alanı için uygunluğunu belirler (Noack ve ark., 1973). Bu nedenle bir ahşap elemanın rutubete maruz kaldığı kullanım yerlerinde malzemenin boyutsal kararlılığının dikkate alınması önemlidir. Boyutsal kararlılık bakımından ahşap malzeme anizotropik bir malzemedir. Yıllık halkalara teğet yönde, yıllık halkalara radyal yönde ve lifler boyunca daralır ya da genişler (Glass ve Zelinka, 2021). Eski ve yeni örneklerin genişleme yüzdelere ait tanımlayıcı istatistiksel bilgiler Çizelge 1'de belirtilmiştir.

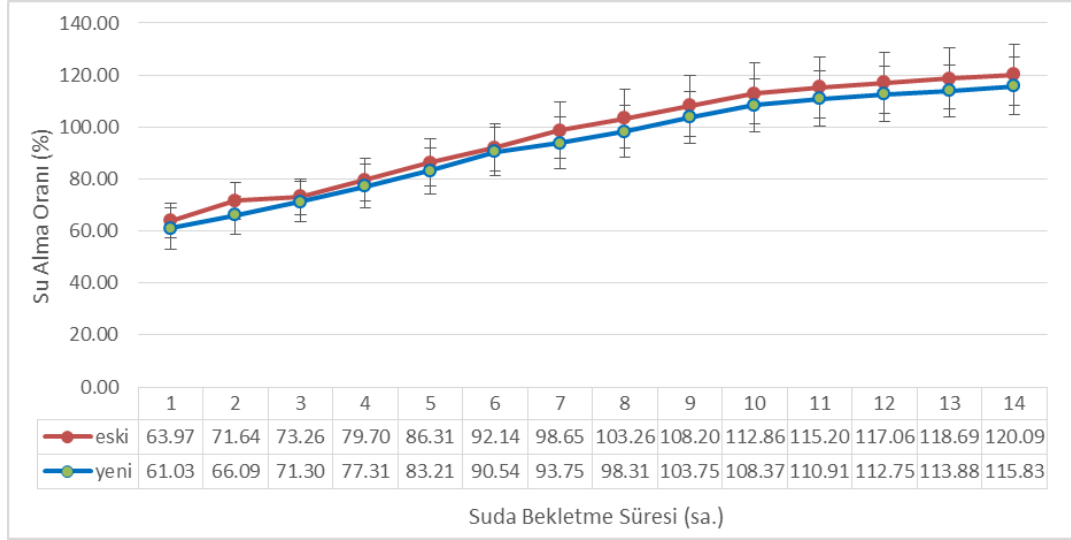
Çizelge 1. Eski ve yeni örneklerin genişleme yüzdesine ait tanımlayıcı istatistiksel bilgiler

Genişleme yüzdesi (%)			Sig. (2-tailed)
t	Eski	7.80 (0.94)*	0.030**
	Yeni	8.48 (0.80)	
r	Eski	4.22 (0.59)	0.001**
	Yeni	5.83 (0.76)	
l	Eski	0.33 (0.03)	0.001**
	Yeni	0.57 (0.04)	

* Standart sapma parantez içerisinde gösterilmiştir. ** $p \leq 0.05$ (p: önem düzeyi)

Çizelge 1’de görüldüğü üzere yeni örneklerin teğet yöndeki genişleme yüzdesi %8.48, radyal yöndeki genişleme yüzdesi %5.83 ve boyuna yöndeki genişleme yüzdesi ise %0.57 olarak belirlenmiştir. Ahşap kültürel miras objeleri ile ilgili sorunların birçoğunun ahşabın şişmesi ve daralmasından kaynaklandığı düşünüldüğünde yaşlanmış ahşabın nem alma davranışına ait bilgiler de önemlidir. Kranitz ve ark., (2016) tarafından yapılan derleme çalışmasında literatürde yaşlanmış ahşabın şişme davranışı konusunda az ve birbiriyle tutarsız kaynaklar bulunduğu belirtilmektedir. Literatürde belirtilen değerlere bakıldığında odunun daralma yüzdelere ait verilerin genişleme yüzdelere ait verilerden oldukça fazla olduğu belirlenmiş olup Aydın ve Çolak (2011), *Picea orientalis* L. odununun teğet yönde genişleme yüzdesini %8.64, radyal yönde genişleme yüzdesini ise %5.41 olarak belirlemişlerdir. Can ve ark., (2012), Türkiye’nin Doğu Karadeniz Bölgesi’nden almış oldukları *Picea orientalis* odununun teğet yöndeki genişleme yüzdesini %6.59 olarak tespit etmişlerdir. Independent-Samples T testi sonucuna göre eski ve yeni örneklerin teğet, radyal ve boyuna yöndeki genişleme yüzdeleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu ve yaşlanmış tavan örneklerinin her üç yöndeki genişleme yüzdelerinin yeni örneklerin değerlerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yaşlı ahşabın azalan higroskopikliği, yaşlanma sürecinde meydana gelen en önemli kimyasal değişim olan hemiselülozların parçalanmasıyla açıklanmaktadır (Obataya, 2017). Ayrıca eski örneklerde arız olan *Anobium punctatum* böceğinin selülozu degrade edebilen enzimler üretme kapasitesine sahip olmaları (Erdin, 2009) eski odun örneklerinin teğet ve radyal yöndeki genişlemesinin yeni örneklerle kıyasla azalmasını sağlamış olabilir.

Ahşap higroskopiktir, yani hücre duvarı polimerlerindeki hidroksil grupları çevredeki nemle hidrojen bağı kurma eğilimindedir. Su, hücre duvarına eklendikçe ahşap hacmi neredeyse eklenen su hacmiyle orantılı olarak artar. Ahşabın şişmesi, hücre duvarı lif doygunluk noktasına ulaşıncaya kadar devam eder. Bu noktadan sonra alınan su, boşluklarda (lümenlerde) serbest su olarak kalır ve artık ahşabın şişmesine katkı sağlamaz (Rowell, 2013). Dolayısıyla bu çalışmada hem eski hem yeni örnekler, örnek rutubeti lif doygunluk noktasına (~%30) ulaşıncaya kadar su alıp şişme olayı gerçekleşmiş ve boyutlarında artış olmuştur. Lif doygunluk noktasından sonra su alma eylemi devam etmiş (Şekil 5) ancak örnek boyutlarında bir değişiklik olmamıştır. Eski ve yeni örneklerin suda bekletme sürelerine göre su alma oranları (%) Şekil 5’te gösterilmiştir. Buna göre iki haftalık suda bekletme sürecinde 24 saatte bir yapılan ölçümler sonucunda 24. saatten 336. saate kadar su alma oranları eski örnekler için %63.97-120.09 ve yeni örnekler için %61.03-115.83 olarak bulunmuştur. Her iki örnek grubu için suda bekletme süresi arttıkça su alma oranlarının arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 5. Eski ve yeni örneklerin suda bekletme sürelerine göre su alma oranları

Su alma oranına ait Independent-Samples T testi sonuçları Çizelge 2’de belirtilmiştir.

Çizelge 2. Suda bekletme süresine göre SAO’ya ait Independent-Samples T testi sonuçları

Suda bekletme süresi (sa.)	Sig. (2-tailed)
24	0.24
48	0.03*
72	0.43
96	0.40
120	0.32
144	0.62
168	0.18
192	0.11
216	0.06
240	0.10
264	0.18
288	0.18
312	0.20
336	0.22

* $p \leq 0.05$ (p: önem düzeyi)

Independent-Samples T testi sonucuna göre eski ve yeni örneklerin 48. sa. hariç olmak üzere su alma oranları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı ($p \geq 0.05$) belirlenmiştir. Eski örnekler, 48 sa. suda bekletme süresinden sonra farklı bir higroskopik davranış göstererek yeni örneklerden daha fazla su almıştır. Bu saatten sonra suda bekletme süresi arttıkça yeni örnekler eski örneklerin aldığı su miktarına yakın oranlarda su almış olmasına rağmen istatistiksel olarak bu iki örnek grubu arasında farklılık olmadığı tespit edilmiştir. Esteban ve ark., (2005), higroskopik yaşlanmayla tanımlanan higroskopisite kaybının yaşlı odunun hücre duvarındaki polar grupların su buharını bağlama yetisini kaybetmesiyle birlikte nem alma kapasitesinin azalması olarak açıklamaktadır. Ayrıca elde edilen bu sonuç, eski örnekler arız olarak odun dokusunu tahrip eden *Anobium punctatum* böceklerinin uçma delikleri açarak odunun permeabilitesini artırmasıyla ilişkili olabilir (Erdin, 2009).

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, tarihi bir caminin eski ahşap tavan elemanlarının odun türü teşhisi, biyolojik tahribatı ve higroskopik özellikleri araştırılmış olup aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Yapılan mikroskobik analizler sonucunda, eski ahşap tavan elemanlarının Doğu ladini (*Picea orientalis* L.) türüne ait olduğu belirlenmiştir.
- Eski ahşap tavan elemanlarının diri odunu üzerinde tahribat yapan böcek türünün *Anobium punctatum* olduğu tespit edilmiştir.
- Eski tavan örneklerinin teğet, radyal ve boyuna yöndeki genişleme yüzdeleri yeni örneklerin genişleme yüzdelerinden daha küçüktür.
- İki haftalık suda bekletme süresince eski ve yeni örnekler genel olarak birbirine benzer bir higroskopik davranış göstermiştir.
- Demirtaş-Derecik-Karaman Merkez Caminin restorasyon çalışmaları kapsamında, tarihi özgünlüğün korunması açısından yeni ahşap tavan malzemesi seçiminde Doğu ladini türünün kullanılması ve yeni ahşap malzemenin fiziksel özellikleri dikkate alınarak iç mekanlarda kullanımında gerekli rutubet derecesine kadar kurutulması önerilmektedir. Ayrıca mevcut ahşap elemanlarda böcek aktivitesinin devam ettiğinin tespit edilmesi durumunda uygun tekniklerle mücadele yöntemleri uygulanmalıdır.

Teşekkür

Yazarlar, örnek temini ve saha çalışmaları sürecinde sağladığı destek ve yardımlar için Trabzon Derecik Karaman Mahallesi Muhtarlığına teşekkür ederler.

Yazar Katkıları

Elif Topaloğlu: Kavramsallaştırma, Metodolojinin belirlenmesi, Araştırmanın yapılması, Analizlerin yapılması, Veri iyileştirme, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma, inceleme ve düzenleme. **Murat Öztürk:** Kavramsallaştırma, Metodolojinin belirlenmesi, Analizlerin yapılması, Kaynaklar, Doğrulama, Görselleştirme. **Derya Ustaömer:** Kavramsallaştırma, Metodolojinin belirlenmesi, Denetleme. **Mesut Yalçın:** Metodolojinin belirlenmesi, Analizlerin yapılması, Kaynaklar, Görselleştirme.

Finansal destek beyanı

Finansal destek alınmamıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- Akkemik, Ü., (2020). *Türkiye'nin bütün ağaçları ve çalıları*, Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları, s. 161-212.
- Allegretti, O., and Raffaelli, F., (2007). External resistance to water vapour transfer of varnishes on wood, *Proceedings of the wood science and for conservation of culture heritage*, Florencia; Uzielli, L., Ed., 93-99.
- Aydın, H., (2017). *Geleneksel Anadolu cami mimarisinde ahşabın yapısal kullanımı*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa, Türkiye.
- Aydın, İ., and Çolak, S., (2011). The changes in some physical and mechanical properties of steamed Spruce (*Picea orientalis* L.) wood, *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 4(1), 63-67.

- Bab, (2000). Bs200Pro Image System Software ISO 9001:2000
- Borror, D. J., Triplehorn, C. A., and Johnson, N. F., (1989). *An introduction to study of insects*, Bull. Entomol. Res., 81, p. 875, DOI: [10.1017/S0007485300051361](https://doi.org/10.1017/S0007485300051361)
- Bozkurt, A. Y., ve Erdin, N., (2011). *Ağaç teknolojisi*, İstanbul Üniversitesi Yayın No: 5029, Orman Fakültesi Yayın No: 445, İstanbul.
- Bozkurt, S. G., (2013). 19.yy da Osmanlı konut mimarisinde iç mekan kurgusunun Safranbolu evleri örneğinde irdelenmesi. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 62(2), 37-70, DOI: [10.17099/jffiu.38322](https://doi.org/10.17099/jffiu.38322)
- Can, A., Yildiz, S., and Yildiz, C. Ü., (2012). The effects of industrial-scale heat treatment and impregnation with boron compounds on water uptake and tangential swelling of some wood species, IRG/WP 12-40599, International Research Group on Wood Protection, 6-10 May 2012, Kuala Lumpur, Malaysia
- Çanakçıoğlu, H., ve Mol, T., (1998). *Orman entomolojisi (zararlı ve yararlı böcekler)*, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, İ. Ü. Yayın No. 4063, O. F. Yayın No. 451, İstanbul.
- Elgharbawy, A. A., and Abied, M. K., (2019). A taxonomic review of Anobiinae and Dorcatominae (Ptinidae: Coleoptera) in Egypt, *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences. A. Entomology*, 12(5), 99-110. DOI: [10.21608/eajbsa.2019.55814](https://doi.org/10.21608/eajbsa.2019.55814)
- Erdin, N., (2009). *Ahşap konservasyonu*, İstanbul Üniversitesi Yayınları, No. 4840, Orman Fakültesi Yayınları, No. 492, İstanbul.
- Esteban, L. G., Gril, J., De Palacios, P. D. P., and Casasús, A. G., (2005). Reduction of wood hygroscopicity and associated dimensional response by repeated humidity cycles, *Annals of Forest Science*, 62(3), 275-284, DOI: [10.1051/forest:2005020](https://doi.org/10.1051/forest:2005020)
- Esteban, L.G., Fernández, F.G., Casasús, A.G., De palacios De Palacios, P., and Gril, J., (2006). Comparison of the hygroscopic behaviour of 205-year-old and recently cut juvenile wood from *Pinus sylvestris* L., *Annals of Forest Science*, 63(3), 309-317, DOI: [10.1051/forest:2006010](https://doi.org/10.1051/forest:2006010)
- Gerçek, Z., (2011). *Doğu Karadeniz bölgesindeki doğal Gymnospermae (Açık Tohumlular) taksonlarının odun atlası*, Trabzon, Türkiye: KTÜ Basımevi, ss. 1.
- Gereke, T., Anheuser, K., Lehmann, E., Kranitz, K., and Niemz, P., (2011). Moisture behaviour of recent and naturally aged wood, *Wood Research*, 56(1), 33-42.
- Glass, S., and Zelinka, S., (2021). *Moisture relations and physical properties of wood*, Chapter 4 in FPL-GTR-282, 4-1.
- Güler, İ. D., ve Tor, Ö., (2023). Kastamonu’da bulunan tarihi ahşap yapıların çatı sistemlerinin incelenmesi, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 55-69. DOI: [10.33725/mamad.1289742](https://doi.org/10.33725/mamad.1289742)
- Hanedar, B., (2021). *İç mekânda ahşap malzeme kullanımı ve örnekler üzerinden incelenmesi*, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.
- ISO 13061-15, (2017) Physical and mechanical properties of wood-test methods for small clear wood specimens-Part 15: Determination of radial and tangential swelling, The International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- Ives, E., (2001). *A guide to wood microtomy: Making quality microslides of wood sections*, Ipswich, United Kingdom.
- Kartal, S. N., (2016). Tarihi ahşap yapılarda biyotik/abiyotik bozunmalar ve koruma/bakım önlemleri, *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, 16, 51-58.
- Kartal, S. N., Terzi, E., ve Köse, C., (2024). *Ahşabın korunması*, T. Akbulut (Ed.), Ahşap: Doğal ve yenilenebilir mühendislik malzemesi içinde (s. 154-185), İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Üniversite Yayınevi, ISBN: 978-605-7880-00-0
- Kaygın, A. T., (2007). *Endüstriyel odun zararlıları*, 1. Basım, Ankara, Türkiye: Nobel Yayın Dağıtım, 243.
- Kazaz, E., (2016). *Trabzon kırsal cami mimarisi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, Türkiye.
- Kohara, J., and Okamoto, H., (1955). Studies of Japanese old timbers, *Scientific Reports of the Saikyo University*, 7(1), 9-20.
- Korkmaz, N., (2016). *Amasya camilerinde ahşap bindirme tavan*, Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, Türkiye.
- Kranitz, K., Sonderegger, W., Bues, C.T., and Niemz, P., (2016). Effects of aging on wood: a literature review, *Wood Science and Technology*, 50(1), 7-22, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0766-0>
- Merev, N., (1998). *Doğu Karadeniz bölgesindeki doğal Angiospermae taksonlarının odun anatomisi*, Trabzon, Türkiye: KTÜ Basımevi, ss. 9-12.
- Noack, D., Schwab, E., and Bartz, A., (1973). Characteristics for a judgment of the sorption and swelling behavior of wood, *Wood Science and Technology*, 7, 218-236, DOI: [10.1007/BF00355552](https://doi.org/10.1007/BF00355552)
- Noldt, U., and Noldt, G., (2013). Manual on wood-destroying insects and their monitoring, 32 Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries Institute of Wood Technology and Wood Biology (HTB), Hamburg.
- Obataya, E., (2017). Effects of natural and artificial ageing on the physical and acoustic properties of wood in musical instruments, *Journal of Cultural Heritage*, 27, S63-S69, DOI: [10.1016/j.culher.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.02.011)
- Özodabaş, A., (2023). Anadolu'daki tarihi camiler ve Söğüt Çelebi Sultan Mehmet Cami, *Journal of Humanities and Tourism Research*, 13(1), 1-20.
- Richter, H. G., Grosser, D., Heinz, I., and Gasson, P. E., (Eds.), (2004). IAWA list of microscopic features for softwood identification, *IAWA journal*, 25(1), 1-70, DOI: [10.1163/22941932-90000349](https://doi.org/10.1163/22941932-90000349)
- Rowell, R. M., (2013). *Moisture properties*. In: Rowell RM (ed) Handbook of wood chemistry and wood composites, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, pp 75-97.
- Sarı, Y., (2021). *Trabzon ve ilçelerinde camiler*, On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, Samsun, Türkiye.
- Sudo, S., (1968). Anatomical studies on the wood of species of *Picea*, with some considerations on their geographical distribution and taxonomy, *Tokyo Bulletin of the Government Forest Experiment Station*, 215, 39-130.

- Tayla, H., (2007). *Geleneksel Türk mimarisinde yapı sistem ve elemanları I*, 1. baskı, TAÇ Vakfı, İstanbul.
- Topaloglu, E., (2023). Effect of natural aging on selected properties of wooden facade elements made of scots pine and chestnut, *Maderas. Ciencia y tecnología*, 25, 1-12. DOI: [10.4067/s0718-221x2023000100418](https://doi.org/10.4067/s0718-221x2023000100418)
- Zorlu, T., (2017). Karadeniz Bölgesi'nde ahşap camiler: Trabzon Örneği, *Mimarlık* 395, Mayıs-Haziran.



Mobilya endüstrisinde MDF levhalarda yüzey pürüzlülüğü ve yapışma performansına kesim parametrelerinin etkileri

İzham Kılınç* 

ÖZ: Bu çalışmada, farklı yoğunluk seviyelerine sahip orta yoğunluklu lif levhalarda (MDF) kesim parametrelerinin kenar yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve Polivinilklorür (PVC) kenar bantlarının yapışma direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerde 18 mm kalınlığında, düşük (0,65 g/cm³) ve yüksek (0,72 g/cm³) yoğunlukta MDF levhalar kullanılmıştır. Kesimler, 96 dişli ATB geometriye sahip daire testere ile 3000 ve 4500 dev/dk dönme hızlarında ve 6, 9, 12 m/dk ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Kesim sonrası yüzey pürüzlülüğü ölçümleri TS EN ISO 21920-2 standardına uygun olarak yapılmış, yapışma direnci ise ASTM D6862 standardına göre 90° soyma testi ile belirlenmiştir. Varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre yoğunluk, dönme hızı ve ilerleme hızı faktörlerinin hem yüzey pürüzlülüğü hem de yapışma direnci üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkileri bulunmuştur ($p < 0,05$). Yüksek yoğunluklu MDF, yüksek dönme hızı ve düşük ilerleme hızı koşullarında en düşük Ra (3,91 µm) ve en yüksek yapışma direnci (5,87 N/mm) değerlerini vermiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ile yapışma direnci arasında negatif yönlü güçlü bir korelasyon ($r = -0,72$; $p < 0,001$) belirlenmiştir. Sonuç olarak, MDF'nin işlenmesinde özellikle yüksek yoğunluklu levhaların ve yüksek dönme hızı ile düşük ilerleme hızı parametrelerinin seçilmesinin, hem yüzey kalitesini hem de PVC kenar bantlarının yapışma performansını optimize ederek artırdığı ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Kenar Bantlama, MDF, Yapışma Direnci, Yüzey Pürüzlülüğü

Effects of cutting parameters on surface roughness and adhesion performance of MDF panels in the furniture industry

ABSTRACT: In this study, the effects of cutting parameters on edge surface roughness (Ra) and adhesion strength of Polyvinyl Chloride (PVC) edge bands in medium-density fiberboard (MDF) with different density levels were investigated. MDF panels with 18 mm thickness and two density levels (low: 0.65 g/cm³ and high: 0.72 g/cm³) were used in the experiments. Cutting was performed using a 96-tooth circular saw blade with an alternate top bevel (ATB) geometry at spindle speeds of 3000 and 4500 rpm and feed rates of 6, 9, and 12 m/min. Surface roughness was measured according to TS EN ISO 21920-2, while adhesion strength was determined by the 90° peel test in accordance with ASTM D6862. Analysis of variance (ANOVA) revealed that density, spindle speed, and feed rate had statistically significant effects on both surface roughness and adhesion strength ($p < 0.05$). High-density MDF combined with higher spindle speed and lower feed rate yielded the lowest Ra value (3.91 µm) and the highest adhesion strength (5.87 N/mm). Furthermore, a strong negative correlation was found between surface roughness and adhesion strength ($r = -0.72$; $p < 0.001$). Overall, the findings demonstrated that selecting appropriate cutting parameters in MDF processing improves both surface quality and the adhesion performance of PVC edge bands.

Keywords: Adhesion Strength, Edge Banding, MDF, Surface Roughness

1 Giriş

Ahşap esaslı levhalar, özellikle orta yoğunluklu lif levhalar (MDF), mobilya ve iç mekân endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Liflerin reçine ve katkılarla ısı ve basınç altında birleştirilmesiyle üretilen MDF, homojen yapısı sayesinde doğal ahşaba kıyasla daha öngörülebilir işlenebilirlik ve yüzey kalitesi sunmaktadır. Bununla birlikte, işleme sırasında ortaya çıkan yüzey kusurları, özellikle kenar bantlama uygulamalarında yapışma performansını doğrudan etkilemektedir (Karaman, 2021; Demir ve ark., 2021). Kenar bantlama işlemi, MDF levhaların estetik görünümünü iyileştirmenin yanı sıra darbe direnci ve nem direncini artırmak amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda, yüzey kalitesi ile kenar bantlarının yapışma gücü arasında yakın bir ilişki olduğu literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır (Rudawska, 2020).

MDF levhaların yoğunluğu, liflerin sıkışma derecesini ve iç gözenek yapısını belirleyerek hem işlenebilirliği hem de yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Yoğunluğun yanı sıra, yüzey pürüzlülüğü üretimde kullanılan odun liflerinin morfolojik özelliklerine, reçine tipine (Hiziroğlu ve Suzuki, 2007) ve özellikle levha üretim hattındaki son kalibrasyon/zımparalama işlemlerinin kalitesine (Palija ve ark., 2019) yakından bağlıdır. Yoğunluğu yüksek levhalarda lifler daha sıkı bir şekilde bağlandığından, yüzey kalitesi genellikle daha düzgün olurken, düşük yoğunluklu levhalarda liflerin gevşek yapısı pürüzlülüğü artırabilmektedir. Bu durum, MDF'nin yüzey özellikleriyle bağlantılı olarak tutkal ıslanabilirliği ve yapışma direncini de etkilemektedir (Kúdela ve Liptáková, 2006; Kureli ve Doğanay, 2015).

Kesim işlemlerinde kullanılan parametreler de yüzey pürüzlülüğü üzerinde kritik rol oynamaktadır. Özellikle yatar daire testere gibi döner kesim sistemlerinde dönme hızı (İşleyen ve Karamanoğlu, 2019) ve ilerleme hızı (Sütçü ve Karagöz, 2012) kenar yüzey kalitesini belirleyen en önemli faktörlerdendir. Literatürde yüksek dönme hızı ile düşük ilerleme hızının daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağladığı; buna karşılık ilerleme hızının artmasıyla pürüzlülüğün yükseldiği sıkça rapor edilmiştir (Davim ve ark., 2009; Sütçü ve Karagöz, 2012). Ayrıca kesim parametrelerinin yalnızca yüzey kalitesi değil, iş sağlığı ve güvenliği açısından da (örneğin; toz ve gürültü oluşumu) önemli çıktılar üzerinde etkili olduğu bildirilmektedir (Gül ve Korkmaz, 2025). Bunun yanında, bazı çalışmalarda malzeme sıcaklığı gibi çevresel koşulların da yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkileyebildiği ortaya konmuştur (Korkmaz ve ark., 2024). Ancak bazı çalışmalar, kesim derinliği ya da testere geometrisi gibi parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde sınırlı etkili olabileceğini göstermektedir (İşleyen ve Karamanoğlu, 2015; Li ve ark., 2017). Bu nedenle, yüzey kalitesinin yalnızca tek bir parametreye değil, kesim sürecindeki değişkenlerin birlikte etkisine bağlı olduğu kabul edilmektedir.

Yüzey pürüzlülüğünün, PVC kenar bantlarının yapışma direnci üzerinde doğrudan etkisi bulunduğu birçok çalışmada gösterilmiştir (Özdemir ve Hiziroğlu, 2009; Budhe ve ark., 2015a; Kureli ve Doğanay, 2015). Yapışma mekanizması hem mekanik kilitlenmeye hem moleküler bağlanmaya dayandığından, optimum yüzey pürüzlülüğü düzeyi tutkalın yüzeye nüfuz etmesini ve güçlü bir yapışma sağlamayı desteklemektedir. Ancak yüzey çok pürüzlü olursa temas yüzeyi azalabilir; çok düzgün olması durumunda da tutkal nüfuz kabiliyeti düşebilir.

Kenar bant kalınlığı da yapışma performansında önemli bir değişkendir. PVC bantlarda yaygın olarak kullanılan kalınlık olan 0.80 mm, bazı çalışmalarda yapışma / gömme dayanımı açısından daha yüksek performans göstermiştir (Vlaović ve ark., 2024; Karaman ve ark., 2025). Bu sebeple, literatürde sıkça tercih edilen bant kalınlığından yola çıkılarak yapılacak

değerlendirmelerin, çalışmanın hem akademik hem de pratik geçerliliğini artırabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmanın amacı; farklı yoğunluk düzeylerine sahip orta yoğunluklu lif levhalarda (MDF) yoğunluk, dönme hızı ve ilerleme hızı gibi kesim parametrelerinin kenar yüzey pürüzlülüğü (R_a) ile 0,80 mm kalınlığındaki PVC kenar bantlarının yapışma direnci üzerindeki etkilerini istatistiksel olarak ortaya koymak ve bu bulgular doğrultusunda optimum kesim koşullarını tanımlamaktır.

2 Materyal ve Metot

2.1 Materyal

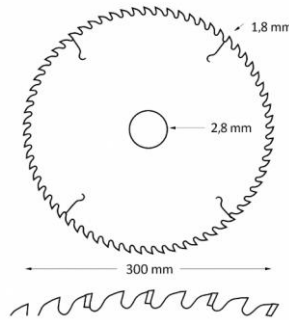
Bu çalışmada mobilya endüstrisinde yaygın olarak kullanılan düşük ve yüksek yoğunlukta MDF levhaları kullanılmıştır. Levhalar 18 mm kalınlıkta olup, deneylerden önce 23 ± 2 °C sıcaklık ve $\%50 \pm 5$ bağıl nem koşullarında 24 saat boyunca kondisyonlanmıştır. Çalışmada kullanılan MDF levhaların yoğunluk değerleri ve nem içerikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Deneylerde kullanılmak üzere MDF levhalar 200×100 mm boyutlarında kesilmiştir. Kesim işlemleri, üç fazlı elektrik motoru ile çalışan bir yatar daire testere makinesinde gerçekleştirilmiştir. Tezgâh, yüksüz durumda 3000 ve 4500 dev/dk olmak üzere iki farklı dönme hızında çalışabilmektedir. İlerleme hızları ise 6, 9 ve 12 m/dk olarak uygulanmıştır. Sabit ilerleme hızını sağlamak için dört tekerlekli bir itici düzenek kullanılmıştır.

Çizelge 1. MDF örneklerinin yoğunluk ve nem değerleri

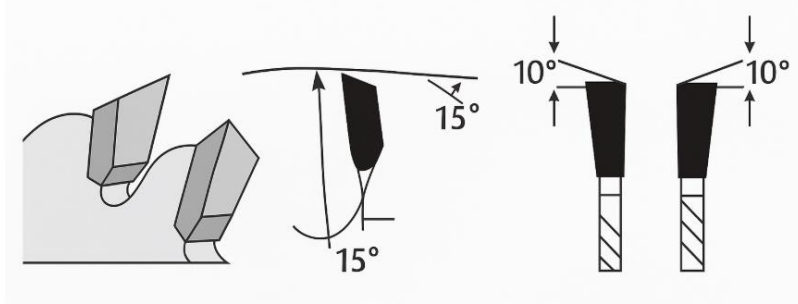
Malzeme	Ortalama Yoğunluk (g/cm ³)	Nem İçeriği (%)
MDF – Düşük Yoğunluk	0.65	7.5
MDF – Yüksek Yoğunluk	0.72	7.8

Kesimlerde alternat tepe açılı (ATB) geometriye sahip, 300 mm çapında, 96 dişli daire testere bıçakları kullanılmıştır. Bıçakların plaka kalınlığı 1,8 mm, kesim genişliği (kerf) ise 2,8 mm’dir (Şekil 1). Tüm kesimlerde kullanılmamış bıçaklar tercih edilmiş ve bıçak aşınmasının deney sonuçlarını etkilememesine özen gösterilmiştir. Kesimlerin ardından numunelerin kenar yüzeyleri tozdan arındırılmış ve bantlama/test işlemlerine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan 96 dişli ATB daire testere bıçığının şematik gösterimi.

Kullanılan testere bıçaklarının diş geometrileri aynı olup, tamamı ATB formundadır. Şekil 2’de testere dişlerine ait bazı geometrik özellikler (15° kesme açısı ve 10° eğim açısı) gösterilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan testere dişlerinin geometrik özellikleri

Kenar bantlama işlemlerinde, mobilya endüstrisinde neme karşı direnci, darbe dayanımı, estetik çeşitliliği ve uygulama kolaylığı gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edilen 0.80 mm kalınlığında PVC kenar bandı ve EVA bazlı hotmelt tutkal kullanılmıştır. Tutkal, uygulama öncesinde $190 \pm 10^\circ\text{C}$ sıcaklıkta eritilmiş ve silindir sistemi aracılığıyla MDF kenarına yaklaşık 200 g/m^2 olacak şekilde film halinde yayılmıştır. PVC bant, baskı silindirleri yardımıyla yüzeye preslenmiş, hat ilerleme hızı ise 6 – 12 m/dk arasında ayarlanmıştır. Minimum parça uzunluğu sınırlaması nedeniyle numuneler önce $200 \times 100\text{ mm}$ boyutlarında bantlanmış, ardından yapışma testlerinde kullanılmak üzere 100 mm uzunluğunda kesilmiştir. Bantlama işlemi sonrası numuneler oda koşullarında 24 saat kondisyonlanmıştır.

2.2 Metot

2.2.1 Yüzey pürüzlülüğü testi

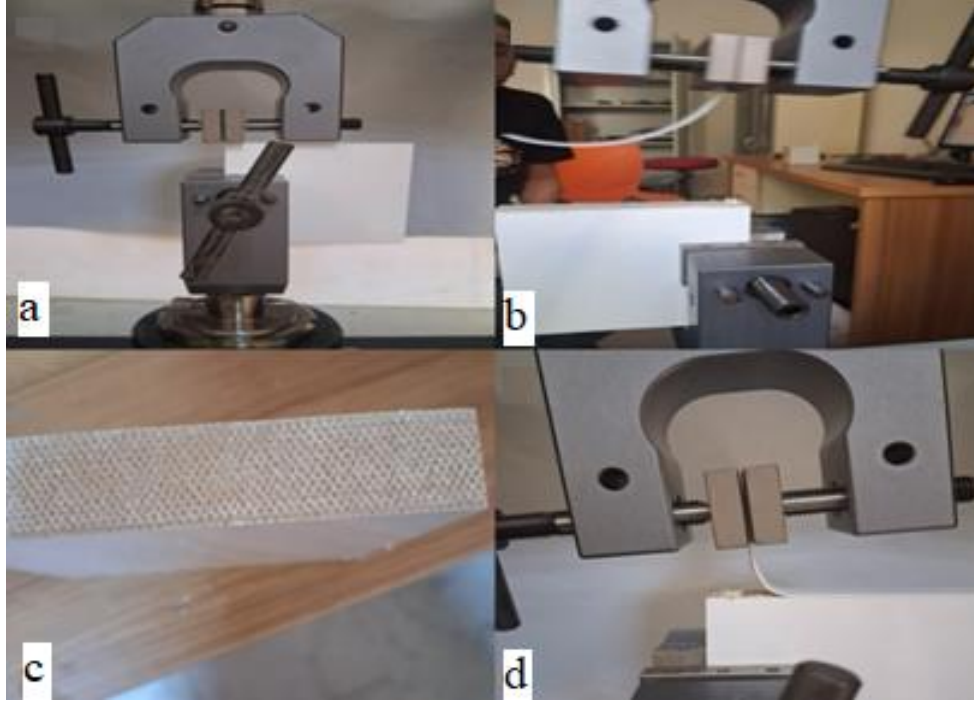
Pürüzlülük ölçümleri, TS EN ISO 21920-2 (2022) standardına göre, $0,01\text{ }\mu\text{m}$ hassasiyete sahip kalibreli Time TR 110 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Çalışmadaki 12 farklı deney kombinasyonunun her biri için 10 tekrar ($n=10$) olmak üzere toplam 120 örnek üzerinde ölçüm gerçekleştirilmiştir. Her bir örnekte, önceden belirlenmiş üç farklı bölgeden ölçüm alınmış ve bu üç ölçümün aritmetik ortalaması, o örneğin nihai ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değeri olarak hesaplanmıştır (Şekil 3). Ölçümler, $5\text{ }\mu\text{m}$ çaplı iğnenin 1,2 mm’lik kesme uzunluğu ile liflere dik yönde hareketi sayesinde $23 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $50 \pm 5\%$ bağıl nem koşullarında yapılmıştır.



Şekil 3. Pürüzlülük ölçüm işlemi.

2.2.2 Yapışma direnci testi

PVC kenar bantlarının yapışma dayanımı, ASTM D6862 (2004) standardına göre 90° soyma testi ile belirlenmiştir. Testler, Shimadzu AG-IC universal test cihazında, 5 kN yük hücresi ile 100 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Numunelerin kenar bantları hazırlanırken, üst çenenin kavrayabilmesi için bant uçları yaklaşık 25 mm serbest bırakılmıştır. Test sırasında numuneler alt çeneye sabitlenmiş, bant ise üst çeneye bağlanarak 90° açıyla yukarı yönde soyulmuştur. İlk 10 mm'lik bölüm başlangıç etkileri nedeniyle değerlendirme dışı tutulmuş, daha sonra elde edilen kuvvet değerleri bant genişliğine bölünerek soyma direnci (N/mm) hesaplanmıştır. Çalışmadaki 12 farklı deney kombinasyonunun her biri için beş tekrar ($n = 5$) olmak üzere, toplam 60 örnek üzerinde soyma testi yapılmış ve sonuçlar ortalama $\pm$ standart sapma şeklinde verilmiştir.



Şekil 4. Yapışma direnci testi. Numunenin cihaza yerleştirilmesi (a), deney sonrası çenede kalan kenar bandı (b), yüzeyde tutkal dağılımı (c) ve bandın 90° açıyla soyulma başlangıcı (d)

2.2.3 İstatistik hesaplarının yapılması

Çalışma, 2 (Yoğunluk) $\times$ 2 (Dönme hızı) $\times$ 3 (İlerleme hızı) seviyeli tam faktöriyel desene göre tasarlanmış olup, toplam 12 farklı deney kombinasyonundan elde edilen verilerin değerlendirilmesinde varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Yoğunluk (A), dönme hızı (B) ve ilerleme hızı (C) ana faktörlerinin yanı sıra bu faktörlerin ikili ($A \times B$, $A \times C$, $B \times C$) ve üçlü ($A \times B \times C$) etkileşimlerinin anlamlılığı %95 güven düzeyinde ($\alpha = 0,05$) test edilmiştir. Varyans homojenliği kontrol edildikten sonra, istatistiksel olarak anlamlı bulunan gruplar arasındaki farklılıkların belirlenmesinde Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Ayrıca, yapışma direnci testine tabi tutulan 60 adet örneğin, test öncesi ölçülen yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri ile test sonrası elde edilen yapışma direnci (N/mm) değerleri çiftleştirilerek ($n=60$), bu iki değişken arasındaki doğrusal ilişki Pearson korelasyon analizi ile incelenmiştir. Tüm analizler, SPSS 25.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular ve Tartışma

3.1 Yüzey pürüzlülüğü testi (Ra)

Farklı yoğunluk, dönme hızı ve ilerleme hızı seviyelerinin MDF levhaların yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerine etkisini belirlemek amacıyla yapılan kesim işlemlerinden elde edilen ortalama değerler farklılık göstermiştir. Bu farklılığa neden olan faktörleri ortaya koymak için varyans analizi (ANOVA) yapılmış ve sonuçlar Çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 2. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerine ait varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Faktör	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F değeri	P değeri
Yoğunluk (A)	1	45.47	45.47	58.32	p < 0.001*
Dönme hızı	1	32.45	32.45	41.6	p < 0.001*
İlerleme hızı	2	144.3	72.15	92.5	p < 0.001*
A × B	1	4.84	4.84	6.21	0.014*
A × C	2	4.84	2.42	3.1	0.048*
B × C	2	8.42	4.21	5.4	0.006*
A × B × C	2	1.87	0.94	1.2	0.305
Hata	108	84.24	0.78	—	—
Model	11	242.19	22.02	28.24	p < 0.001*

*95% güven düzeyinde anlamlı ($\alpha = 0,05$).

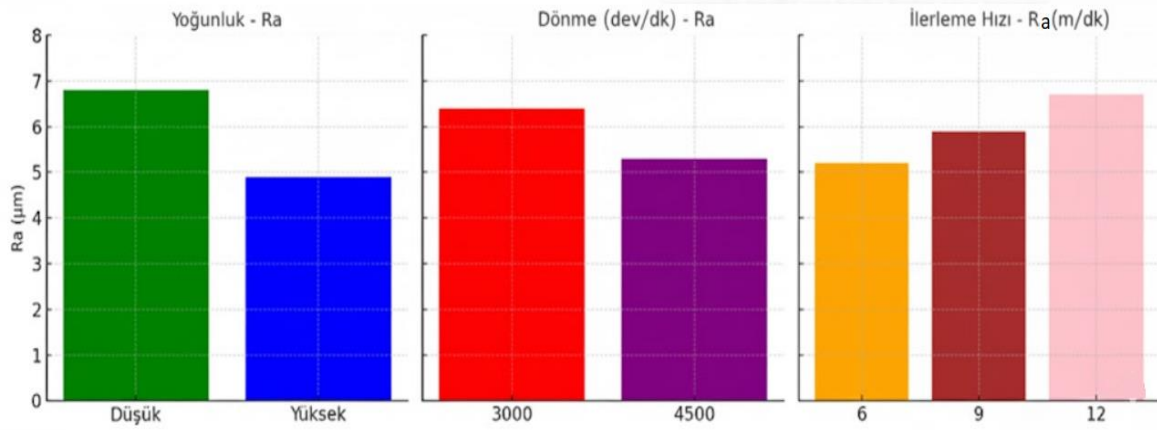
ANOVA sonuçlarına göre, yoğunluk, dönme hızı ve ilerleme hızı faktörleri yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p \leq 0.05$). Ayrıca A×B, A×C ve B×C ikili etkileşimleri anlamlı, A×B×C üçlü etkileşimi ise istatistiksel olarak anlamlı değildir. Bu farklılıkların hangi seviyelerden kaynaklandığını ortaya koymak amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmış ve sonuçlar Çizelge 3’te sunulmuştur.

Çizelge 3. Yoğunluk, dönme hızı ve ilerleme hızı faktörlerine ait Duncan çoklu karşılaştırma sonuçları

Faktör	Seviye	$\bar{x}$ (μm)	HG
Yoğunluk	Düşük (0.65 g/cm ³)	6.80	A
	Yüksek (0.72 g/cm ³)	5.10	B
Dönme hızı	3000 dev/dk	6.40	A
	4500 dev/dk	5.30	B
İlerleme hızı	6 m/dk	5.20	C
	9 m/dk	5.90	B

Not: $\bar{x}$ = aritmetik ortalama; HG = homojenlik grubu. Aynı harfi paylaşan ortalamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı fark yoktur ($p < 0,05$).

Çizelge 3’e göre, MDF yoğunluk düzeyinde en yüksek yüzey pürüzlülüğü düşük yoğunluklu levhalarda (6,80 μm), en düşük ise yüksek yoğunluklu levhalarda (5,10 μm) ölçülmüştür. Yoğunluk arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı görülmüştür. Dönme hızı faktöründe en yüksek Ra değeri 3000 dev/dk’da (6,40 μm), en düşük ise 4500 dev/dk’da (5,30 μm) elde edilmiştir. İlerleme hızı faktöründe ise 12 m/dk koşulunda pürüzlülük en yüksek (6,70 μm), 6 m/dk’ta en düşük (5,20 μm) bulunmuştur. Bu bulgular, yüksek yoğunluk ve yüksek dönme hızının yüzey kalitesini iyileştirdiğini, ilerleme hızının artışının ise yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediğini göstermektedir. Şekil 5’te faktör ortalamalarının grafiksel dağılımları sunulmuştur.



Şekil 5. MDF yoğunluğu, dönme hızı ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri üzerindeki etkileri

Şekil 5'teki sonuçlara göre, MDF yoğunluğu, dönme hızı ve ilerleme hızı faktörleri birlikte değerlendirildiğinde en yüksek yüzey pürüzlülüğü düşük yoğunluklu MDF'nin 3000 dev/dk dönme hızı ve 12 m/dk ilerleme hızı koşulunda 8,12 µm, en düşük yüzey pürüzlülüğü ise yüksek yoğunluklu MDF'nin 4500 dev/dk dönme hızı ve 6 m/dk ilerleme hızı koşulunda 4,05 µm olarak ölçülmüştür.

3.2 Yapışma direnci testi (N/mm)

PVC kenar bantlarının yapışma direncine yoğunluk, dönme hızı ve ilerleme hızı faktörlerinin etkilerini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen 90° soyma testlerinden elde edilen veriler üzerinde yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Yapışma direnci (N/mm) değerlerine ait varyans analizi (ANOVA) sonuçları.

Faktör	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F değeri	P değeri
Yoğunluk (A)	1	28.42	28.42	57.90	p < 0.001*
Dönme hızı (B)	1	22.16	22.16	45.10	p < 0.001*
İlerleme hızı (C)	2	36.88	18.44	37.50	p < 0.001*
A × B	1	3.12	3.12	6.36	0.013*
A × C	2	2.46	1.23	2.50	0.089
B × C	2	2.84	1.42	2.90	0.062
A × B × C	2	1.20	0.60	1.20	0.303
Hata	48	23.60	0.49	—	—
Model	11	97.08	8.83	18.00	p < 0.001*

*95% güven düzeyinde anlamlı ($\alpha = 0,05$).

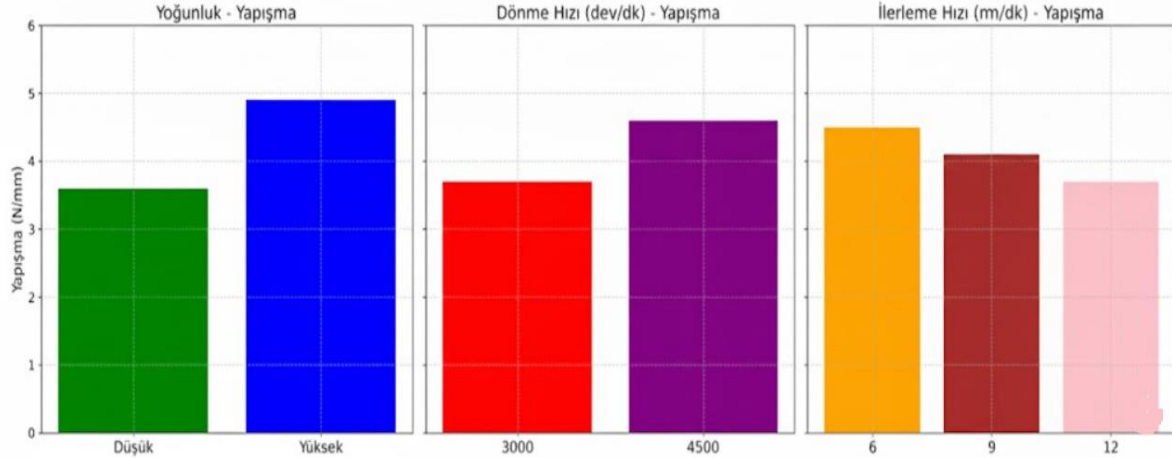
ANOVA sonuçlarına göre, yoğunluk, dönme hızı ve ilerleme hızı faktörleri ile A×B etkileşimi yapışma direnci üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p \leq 0,05$). A×C, B×C ve A×B×C etkileşimleri ise istatistiksel olarak anlamlı değildir. Faktör düzeyleri arasındaki farklılıkların belirlenmesi amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmış ve sonuçlar Çizelge 5'te sunulmuştur.

Çizelge 5. Yoğunluk, dönme hızı ve ilerleme hızı faktörlerine ait Duncan çoklu karşılaştırma sonuçları

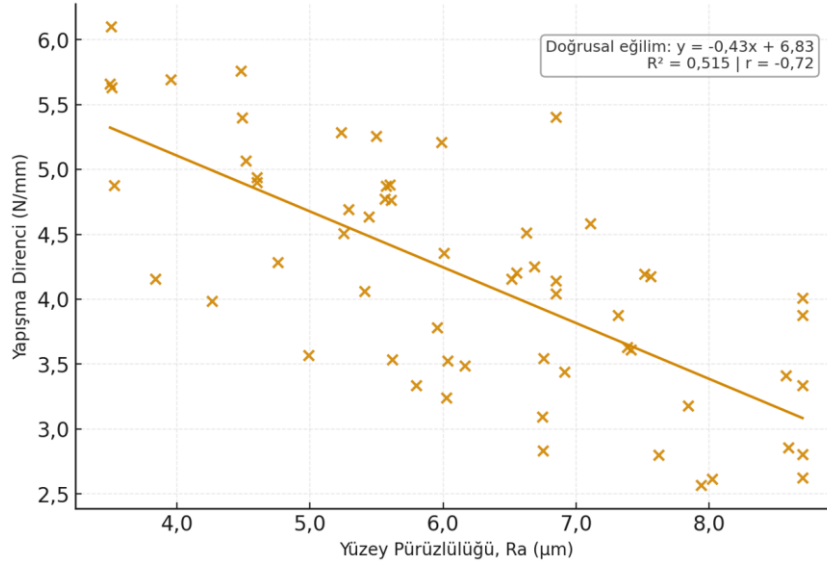
Faktör	Seviye	$\bar{x}$ (N/mm)	HG
Yoğunluk	Düşük (0.65 g/cm ³)	3.45	B
	Yüksek (0.72 g/cm ³)	4.75	A
Dönme hızı	3000 dev/dk	3.60	B
	4500 dev/dk	4.60	A
İlerleme hızı	6 m/dk	4.55	A
	9 m/dk	4.05	B
	12 m/dk	3.55	C

Not: $\bar{x}$ = aritmetik ortalama; HG = homojenlik grubu. Aynı harfi paylaşan ortalamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı fark yoktur ($p < 0,05$).

Çizelge 5'e göre MDF yoğunluk düzeyinde en yüksek yapışma direnci yüksek yoğunluklu levhalarda (4.75 N/mm), en düşük ise düşük yoğunluklu levhalarda (3.45 N/mm) ölçülmüştür. Dönme hızı faktöründe en yüksek değer 4500 dev/dk'da (4.60 N/mm), en düşük ise 3000 dev/dk'da (3.60 N/mm) elde edilmiştir. İlerleme hızı faktöründe ise en yüksek yapışma direnci 6 m/dk'da (4.55 N/mm), en düşük değer ise 12 m/dk'da (3.55 N/mm) bulunmuştur. Bu bulgular, yoğunluk artışı ve dönme hızının yükselmesinin yapışma direncini belirgin şekilde artırdığını, ilerleme hızının artışının ise yapışma direncini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Şekil 6'da faktör ortalamalarının grafiksel dağılımları, Şekil 7'de ise yüzey pürüzlülüğü ile yapışma direnci arasındaki negatif korelasyon sunulmuştur.

**Şekil 6.** MDF yoğunluğu, dönme hızı ve ilerleme hızının yapışma direnci (N/mm) üzerindeki etkileri.

Şekil 6'daki sonuçlara göre, yapışma direncini etkileyen faktörler arasında en yüksek değer, yüksek yoğunluklu MDF'nin 4500 dev/dk dönme hızı ve 6 m/dk ilerleme hızı koşulunda 5.87 N/mm olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, en düşük yapışma direnci düşük yoğunluklu MDF'nin 3000 dev/dk dönme hızı ve 12 m/dk ilerleme hızı koşulunda 2.37 N/mm olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ile yapışma direnci arasındaki bu ters yönlü ilişkiyi ($r = -0,72$; $p < 0,001$) göstermek amacıyla, yapışma testi grubundaki 60 adet örneğin ($n=60$) bireysel Ra ve yapışma direnci veri çiftlerinin kullanıldığı dağılım grafiği Şekil 7'de sunulmaktadır.



Şekil 7. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) ile yapışma direnci arasındaki ilişki.

Şekil 7'ye göre, yüzey pürüzlülüğü (Ra) ile yapışma direnci (N/mm) arasında negatif yönlü ve güçlü bir korelasyon belirlenmiştir ($r = -0,72$; $p < 0,001$). Daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinde yapışma direnci daha yüksek seviyelerde ölçülmüş, yüksek pürüzlülük değerlerinde ise yapışma direnci belirgin şekilde azalmıştır. Bu bulgu, kenar yüzeyinin düzgünlüğünün artmasının PVC kenar bantlarının yapışma performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

3.3 Tartışma

Bu çalışmada iki farklı yoğunluk seviyesine sahip MDF levhalarda dönme hızı (3000–4500 dev/dk) ve ilerleme hızı (6–12 m/dk) değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) ile PVC kenar bantlarının 90° soyma dayanımı (N/mm) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bulgular, yalnızca tek bir parametrenin değil, MDF'nin fiziksel yapısı ile işleme koşullarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Yüzey pürüzlülüğü açısından elde edilen sonuçlar, yoğunluğun artışıyla Ra'nın azaldığını ortaya koymuştur. Bu, yüksek yoğunluklu MDF'de liflerin daha sıkı paketlenmesi ve lazer ya da testere kesimi sırasında lif çekilmesinin azalmasıyla açıklanabilir. Literatürde de benzer şekilde, MDF yoğunluğu yükseldikçe yüzey pürüzlülüğünde iyileşme tespit edilmiştir (Bal ve Gündeş, 2020; Demir ve ark., 2021). Kesim parametreleri açısından incelendiğinde, dönme hızının artışının Ra'yı düşürmesi ve ilerleme hızının artışının Ra'yı yükseltmesi eğilimi, önceki araştırmaların bulgularıyla uyumludur (Davim ve ark., 2009; Sütçü ve Karagöz, 2012). Bu sonuç, talaş kaldırma mekanizmasının dönme hızı ile ilerleme hızı etkileşimiyle yüzey oluşumuna doğrudan katkıda bulunduğunu destekler.

Yapışma direnci bulgularına bakıldığında, en yüksek değerlerin yüksek yoğunluklu MDF'de ve yüksek dönme hızı + düşük ilerleme hızı koşullarında elde edildiği görülmektedir. Bu durum, düzgün yüzeyin tutkalın homojen yayılımını kolaylaştırması ve mekanik kilitleme etkinliğini artırması ile uyumludur (Frihart, 2005; Budhe ve ark., 2015b). Literatürde de yüzey kalitesi ile yapışma performansı arasında güçlü ilişki olduğu vurgulanmaktadır (Özdemir ve ark., 2009). Ayrıca kenar bantlamada soyma dayanımının proses parametrelerine duyarlı olduğu (ör. besleme hızı, yapıştırıcı miktarı/sıcaklığı) da rapor edilmiştir (Koç, 2025). Bu çalışmadaki sonuç, bu literatürdeki öneriyle tutarlıdır.

Ra ile soyma dayanımı arasında saptanan negatif yönlü korelasyon ($r = -0,72$) da bu ilişkiyi destekler. Bu bulgu, pürüzlülük azaldıkça yapışma direncinin arttığını göstermekte; yani daha düzgün kenar yüzeylerinin PVC bant yapışmasında avantaj sağladığını ortaya koymaktadır. Bu ilişki, MDF işlenmesi sürecinde yüzey kalitesinin doğrudan yapışma performansına yansıtıldığını gösteren önceki çalışmalarla da örtüşmektedir.

Genel değerlendirmeye, bu çalışma yüksek yoğunluk, yüksek dönme hızı ve düşük ilerleme hızı kombinasyonlarının hem yüzey kalitesi hem de yapışma dayanımını olumlu etkilediğini göstermiştir. Bu bulgular, özellikle MDF üreticileri ve mobilya sanayinde, kenar bantlama uygulama parametrelerinin optimizasyonu açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır. Ancak, bu çalışmada sadece iki yoğunluk seviyesi ve belirli parametre seviyeleri incelenmiştir; ileriki çalışmalarda diş geometrisi, kesim derinliği, bant kalınlığı gibi değişkenlerin de değerlendirilmesi önerilir.

4 Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, farklı yoğunluk seviyelerine sahip MDF levhalarda dönme hızı ve ilerleme hızının kenar yüzey pürüzlülüğü (*Ra*) ve 0.80 mm PVC kenar bantlarının yapışma direnci (N/mm) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Yoğunluk etkisi: Yoğunluk arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmış, yapışma direnci artmıştır. Yüksek yoğunluklu MDF en düşük *Ra* ve en yüksek yapışma değerlerini vermiştir.
- Dönme hızı etkisi: Dönme hızı 3000'den 4500 dev/dk'ya yükseltildiğinde yüzey pürüzlülüğü azalmış, yapışma direnci ise artmıştır. En uygun sonuçlar 4500 dev/dk'da elde edilmiştir.
- İlerleme hızı etkisi: İlerleme hızının artışı yüzey pürüzlülüğünü artırmış, yapışma direncini ise düşürmüştür. En iyi yapışma performansı 6 m/dk ilerleme hızında sağlanmıştır.
- Korelasyon: Yüzey pürüzlülüğü ile yapışma direnci arasında negatif korelasyon ($r = -0,72$; $p < 0,001$) bulunmuştur. Daha düzgün yüzeyler, PVC kenar bantlarının yapışma gücünü artırmıştır.

Bu bulgular, mobilya endüstrisinde MDF kesim ve kenar bantlama işlemleri için pratik öneriler sunmaktadır. Özellikle yüksek yoğunluklu MDF levhaların tercih edilmesi, testere dönme hızının yüksek (4500 dev/dk), ilerleme hızının ise düşük (6 m/dk) seviyelerde seçilmesi hem yüzey kalitesini hem de yapışma performansını iyileştirmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı PVC bant kalınlıklarının, alternatif tutkal türlerinin (ör. PUR, poliolefin) ve farklı testere geometrilerinin incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca çevresel koşulların (nem, sıcaklık) yapışma performansı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, elde edilen bulguların daha geniş kapsamlı bir şekilde yorumlanmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Yazar Katkıları

İzham Kılınç: Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), Metodolojinin belirlenmesi, Araştırmanın yapılması, Analizlerin yapılması, Veri iyileştirme, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma, inceleme ve düzenleme.

Finansal destek beyanı

Finansal destek alınmamıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- ASTM D6862-04, (2004). Standard test method for 90 degree peel resistance of adhesives, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia
- Bal, B. C., and Gündeş, Z., (2020). Surface roughness of medium-density fiberboard processed with CNC machine, *Measurement*, 153, 107421, DOI: [10.1016/j.measurement.2019.107421](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107421)
- Budhe, S., Banea, M. D., de Barros, S., and da Silva, L. F. M., (2015a). An updated review of adhesively bonded joints in composite materials, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 57, 70–96, DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010)
- Budhe, S., Ghumatkar, A., Birajdar, N., and da Silva, L. F. M., (2015b). Effect of surface roughness using different adherent materials on the adhesive bond strength, *Applied Adhesion Science*, 3(20), 1–13, DOI: [10.1186/s40563-015-0050-4](https://doi.org/10.1186/s40563-015-0050-4)
- Davim, J. P., Clemente, V. C., and Silva, S.3 (2009). Surface roughness aspects in milling MDF (medium density fibreboard), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1–2), 49–55, DOI: [10.1007/s00170-007-1318-z](https://doi.org/10.1007/s00170-007-1318-z)
- Demir, A., Birinci, A. U., and Öztürk, H., (2021). Determination of the surface characteristics of medium density fibreboard processed with CNC machine and optimisation of CNC process parameters by using artificial neural network, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 35, 929–942, DOI: [10.1016/j.cirpj.2021.10.005](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.10.005)
- Frihart, C. R., (2005). Wood adhesion and adhesives, *In Handbook of wood chemistry and wood composites* (pp. 215–278), CRC Press
- Gül, O., and Korkmaz, M., (2025). Measurement and optimization of wood dust and noise levels in table saw operations using response surface methodology, *BioResources*, 20(1), 55–67, DOI: [10.15376/biores.20.4.8848-8862](https://doi.org/10.15376/biores.20.4.8848-8862)
- Hiziroğlu, S., and Suzuki, S., (2007). Evaluation of surface roughness of commercially manufactured particleboard and medium density fiberboard in Japan, *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1-3), 436-440, DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2006.11.011](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.011)
- İşleyen, Ü. K., and Karamanoğlu, M., (2019). The influence of machining parameters on surface roughness of MDF in milling operation, *BioResources*, 14(2), 3266–3277, DOI: [10.15376/biores.14.2.3266-3277](https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3266-3277)
- Karaman, A., (2021). Effects of wooden-dowel species, edge banding thickness, and adhesive types on withdrawal strength in MDF-Lam, *Wood Material Science and Engineering*, 16(4), 269–278, DOI: [10.1080/17480272.2021.1881999](https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1881999)
- Karaman, A., Yeşil, H., and Yazıcı, H., (2025). Effect of edge banding thickness, dowels, and adhesive types on withdrawal strength in oriented strand board, *BioResources*, 20(3), 5664–5677, DOI: [10.15376/biores.20.3.5664-5677](https://doi.org/10.15376/biores.20.3.5664-5677)
- Koc, K. H., Hazir, E., and Şeker, S., (2025). Optimization of edge banding process parameters used for particle board and medium density fibreboard, *BioResources*, 20(1), 1915–1930, DOI: [10.15376/biores.20.1.1915-1930](https://doi.org/10.15376/biores.20.1.1915-1930)

- Korkmaz, M., Budakçı, M., and Kılınç, İ., (2024). Assessment of surface roughness in milling of wood with different material temperature and cutting parameters, *BioResources*, 19(4), 9343–9357, DOI: [10.15376/biores.19.4.9343-9357](https://doi.org/10.15376/biores.19.4.9343-9357)
- Kúdela, J., (2020). Surface properties of a medium density fibreboard evaluated from the viewpoint of its surface treatment, *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*, 62(2), 35–45, DOI: [10.17423/afx.2020.62.2.04](https://doi.org/10.17423/afx.2020.62.2.04)
- Kúdela, J., and Liptáková, E. (2006). Adhesion of coating materials to wood. *Journal of adhesion science and technology*, 20(8), 875-895., DOI: [10.1163/156856106777638725](https://doi.org/10.1163/156856106777638725)
- Kureli, I., and Doganay, S., (2015). The effects of surface roughness, adhesive type, and veneer species on pull-off strength of laminated medium density fibreboard, *BioResources*, 10(1), 1293–1303
- Li, W., Zhang, Z., and Peng, X., (2017). The influences of circular saws with sawteeth of mic-zero-degree radial clearance angles on surface roughness in wood rip sawing, *Annals of Forest Science*, 74(37), 1–10, DOI: [10.1007/s13595-017-0632-3](https://doi.org/10.1007/s13595-017-0632-3)
- Özdemir, T., Hiziroglu, S., and Malkocoglu, A., (2009). Influence of relative humidity on surface quality and adhesion strength of coated medium density fiberboard (MDF) panels, *Materials and Design*, 30(7), 2543–2546, DOI: [10.1016/j.matdes.2008.09.036](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.036)
- Palijsa, T., Jaic, M., and Dzincic, İ., (2019). The impact of sanding system on the surface roughness of medium density fibreboard, *Wood Industry and Engineering*, 1(1), 27-32
- Rudawska, A., Stančková, D., Müller, M., Vitenko, T., and Iasnii, V., (2020). The strength of the adhesive joints of the medium-density fibreboards and particle boards with the PVC film, *Materials*, 14(1), 58–68, DOI: [10.12913/22998624/113612](https://doi.org/10.12913/22998624/113612)
- Sütcü, A., and Karagöz, Ü., (2012). Effect of machining parameters on surface quality after face milling of MDF, *Wood Research*, 57(2), 231–240
- TS EN ISO 21920-2, (2022). Geometrik ürün özellikleri (GPS) – Yüzey pürüzlülüğü: Profil – Bölüm 2: Terimler, tanımlar ve parametreler, Ankara.
- Vlaović, Z., Gržan, T., Župčić, I., Domljan, D., and Mihulja, G., (2024). Strength, durability, and aesthetics of corner joints and edge banding in furniture design: A review, *Applied Sciences*, 14(22), 10285, DOI: [10.3390/app142210285](https://doi.org/10.3390/app142210285)



Enhancing operational efficiency of sawmills in Sri Lanka's state timber sector

Pathmasiri Bandara¹ , Chaminda Kumara Muthumala¹ , Tharindu Dilan Amarasinghe² ,
Faiz Mohideen Mohamed Thassim Marikar³ 

ABSTRACT: The State Timber Corporation (STC), Sri Lanka's sole state timber trader, faces declining timber supply, reducing construction timber production. To meet the growing demand driven by the construction boom, STC must minimize conversion losses and improve crew management in its sawmills. This study identifies waste-reduction strategies through SWOT analysis and examination of timber conversion losses across five sawmills stations using circular, frame, and band saws. Findings revealed losses vary by product type, species, and machinery. Sleeper production of *Eucalyptus grandis* showed 32% loss with Wood Mizer LT40 and 37% with Laimet. Standard sawn timber losses reached 47% for *Eucalyptus grandis* and 54% for *Eucalyptus microcorys*, while Pine recorded 34%. The SWOT analysis identified poor-quality logs, mismanaged marketing, and skilled labor shortages as key challenges. Recommendations include increasing the use of Pine species, training crews, adopting band saws such as Wood mizer, and ensuring a continuous timber supply to enhance production efficiency.

Key words: Sawn timber, Production, State Timber Corporation, Conversion Loss

Sri Lanka devlet kereste sektöründeki kereste fabrikalarının operasyonel verimliliğinin artırılması

ÖZ: Sri Lanka'nın tek devlet kereste tüccarı olan Devlet Kereste Şirketi (STC), azalan kereste arzı ve azalan inşaat kerestesi üretimiyle karşı karşıyadır. İnşaat patlamasının yol açtığı artan talebi karşılamak için STC, dönüşüm kayıplarını en aza indirmeli ve kereste fabrikalarındaki ekip yönetimini iyileştirmelidir. Bu çalışma, beş kereste fabrikası istasyonunda daire testere, çerçeve testere ve şerit testerele kullanılarak yapılan kereste dönüşüm kayıplarının SWOT analizi ve incelenmesi yoluyla atık azaltma stratejilerini belirlemektedir. Bulgular, kayıpların ürün türüne, türe ve makineye göre değiştiğini ortaya koymuştur. *Eucalyptus grandis*'in travers üretimi, Wood Mizer LT40 ile %32 ve Laimet ile %37 kayıp göstermiştir. Standart biçilmiş kereste kayıpları *Eucalyptus grandis* için %47'ye ve *Eucalyptus microcorys* için %54'e ulaşırken, Çam için %34 kaydedilmiştir. SWOT analizi, düşük kaliteli kütükler, kötü yönetilen pazarlama ve kalifiye işgücü eksikliğini temel zorluklar olarak belirlemiştir. Öneriler arasında Çam türlerinin kullanımının artırılması, ekiplerin eğitilmesi, Wood Mizer gibi şerit testerele benimsenmesi ve üretim verimliliğini artırmak için sürekli kereste tedarikinin sağlanması yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kereste, Üretim, Eyalet Kereste Şirketi, Dönüşüm Kaybı

Article history, Received: 01.11.2025, Revised: 17.11.2025, Accepted 23.11.2025, Published: 28.11..2025,* faiz@kdu.ac.lk

¹Research Development and Training Division, State Timber Corporation, Sri Lanka.

²Department of Natural Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

³General Sir John Kotelawala Defense University, Ratmalana, Sri Lanka

To cite: Bandara, MGP., Muthumala, CK., Amarasinghe, WVT.D., and M. Faiz., (2025). Enhancing operational efficiency of sawmills in Sri Lanka's state timber sector, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 8 (2), 307-320, DOI: [10.33725/mamad.1815331](https://doi.org/10.33725/mamad.1815331)

1 Introduction

Like some tropical countries, the forests in Sri Lanka have lost more than 60 percent of their crown cover (from 84 % in 1881 to 24 % in 1992) of dense forests. Prospects are also not very bright unless special care is taken to conserve and develop the remaining forest areas. It broadly indicates that about 35 % of the land is under some form of agriculture, about 32% under natural forests and forest plantations, about 24 % under Trees Outside Forests (TOF), and the remaining 9 % is under other uses (Premakantha et al., 2021). The natural forests of Sri Lanka are currently classified into eight types. Lowland Mesophyllous Evergreen Dipterocarp Forests, Low Land Mesophyllous Evergreen Mixed Rain Forests, Lower Montane Notophyllous Dipterocarp Rain Forests, Lower Montane Notophyllous Evergreen Mixed Rain Forests, Upper Montane Microphyllous Evergreen Dipterocarp Rain Forests, Upper Montane Microphyllous Evergreen Mixed Rain Forests, Low Land Semi-Deciduous Forests, and Low Land Semi-Deciduous Wood Land / Thorn Shrub (Gamage et al., 2017; Peiris and Gunarathne, 2021).

Almost all the natural forests are managed for conservation purposes. Given the extent of remaining natural forest cover need to sustain the country's biological diversity, which is very critical for countries like Sri Lanka, which is named as a biological hotspot. However, timber demand is also increasing with annual population growth. According to recent studies, the current annual timber consumption in Sri Lanka is 1.6 million m³, approximately 10% of which is supplied by imports (Daigneault et al., 2022). The timber supply from natural forests has become limited due to diminishing natural forest cover and restrictions on harvesting and timber transportation. After logging bans were implemented in natural forests in 1992, forest plantations became a prioritized wood source on the island. The forest plantations cover 1.4 % of the total land area in Sri Lanka; 96000 ha belong to the Forest Department. The main plantation species are Teak (*Tectona grandis*), Eucalyptus (mainly *Eucalyptus grandis*), Pine (*Pinus caribaea*) and Mahogany (*Swietenia macrophylla*). The area under plantations is being regularly revised by successive plantation inventories mainly for the development of Plantation Management (Sivakumar, 2021).

The State Timber Corporation of Sri Lanka classifies timber into various classes or grades. These are traditionally based on local knowledge and usage, but recent research has developed enhanced classification systems focusing on wood properties and end-use suitability, dividing timber into quality grades (Q1 to Q4) and considering factors like dimensional stability and durability. This classification provides a systematic way to identify timber species optimized for particular structural or aesthetic applications, facilitating effective resource utilization across the diverse timber species found in Sri Lanka. (Muthumala and Amarasekara, 2013). As of 2005, the growing stock of forests worldwide was about 434 billion cubic meters, 47% of which was commercial (Tsegay and Meng, 2021). As an abundant, carbon-neutral renewable resource, woody materials have been of intense interest as a source of renewable energy. In 1991, approximately 3.5 billion cubic meters of wood were harvested. Dominant uses were for furniture and building construction. Forest Sector Master Plan (FSMP) (Mensah et al., 2025) estimates that the sawn wood requirement will increase from 0.031m³ per capita in 1993 to 0.039 m³ in 2020. The FSMP forecasts that the demand for wood for plywood production could decline, partly because some older pulpwood plants are expected to close due to inefficiency and obsolescence. This reduction in pulp mill operations may lower the overall consumption of wood in the industry, contributing to a potential decrease in plywood production requirements. It indicates that the demand for wooden electricity poles will stay around 20 to 25 thousand poles (300 m³) due to limited

domestic supply, and that of telephone poles may even decline due to their replacement with concrete poles (Chen and Chao, 2021; Rasheed et al., 2023).

The Forest Department was established in 1888 during the period of the English government, and its main task was to protect and develop forest areas. Trees were sold by Cash, Tender, and government stumpage, from the forest for people's needs (Chandrasiri et al., 2022). Caldera and Amarasekara (2015) studied sawmill management and technology on waste reduction at selected sawmills in Moratuwa. The key objective of the study was to find the wastage in conversion from logs to sawn timber and to compare the sawmill efficiency in private sawmills with the state timber corporation sawmills (Caldera and Amarasekera, 2015).

Sri Lankan sawmills are categorized as "small" by world standard due to raw material scarcity and the legal level of technology. State Timber Cooperation (STC) uses several types of saws, including band saws, frame saws and circular saws used to breakdown logs and cut into desired sizes of sawn timber. Machine selection depends on log resources (species, quality, size), financial facilities and available technical knowledge.

There is a major impact on the loss in conversion during log processing due to factors such as the type of wood species, the type of machines employed and the skill and experience of the operators. The effective utilization of raw materials, amalgamated with skilled labour, will lead to effective and profitable sawmilling (Tshavhungwe and Grobbelaar, 2024). If the above factors are considered and managed well, sawn wood available to cater to the market demand will increase. This will pave the way to reduce the exploitation pressure on timber resources in Sri Lanka. The raw material used in sawmills consists of logs from different forest and with different properties. It asserted that the timber yield is affected by several log characteristics such as log diameter, length, taper, eccentricity and sweep. The yield optimization system can significantly improve timber conversion value in sawmills, considering the differences in log characteristics. This study aims to enhance the productivity of sawmills within the State Timber Corporation in Sri Lanka by analyzing machine performance, production processes, and operational challenges. The study seeks to identify key factors affecting efficiency and provide actionable recommendations for optimizing sawmill operations.

2 Material and Method

2.1 Study area

This study was conducted in four locations based on five running sawmills. The details of the selected sawmills are shown in Table 1.

Table 1. Selected sawmills

Location	Number of running sawmills	Used Main sawing machine	Other machines	Production Target 2024 (m ³)
Kappetipola	02	Wood-Mizer (LT 40) (Bands saw)	Edger Machine (Normal)	50
		Laimet (Circular saw)	Cross cutter	40
			Edger Machine (CML)	
Ethgala	01	Wood-Mizer (LT70) Wheran (Maxiprofi – 1000) (Frame saw)	Cross cutter	40
				20
Melsiripura	01	Wood-Mizer (LT40)	Edger Machine	40
Private mill	03	Weheran (Maxiprofi – 1000)	Cross cutter	

Source: STC, 2024

The Keppetipola sawmill complex includes two main sawmills. Each sawmill features have three key components: a main sawing machine (Wood-Mizer LT 40 band saw), followed by a normal edger cutter and a crosscutting machine (a circular saw). The production target for this setup is 50 cubic meters per year. Another sawmill in Keppetipola uses a circular saw machine (Laimet), complemented by a CML product type edger cutter and a circular cross cutter, with an annual production of 40 cubic meters (Table 1).

2.2 Arrangement of sawmills

There are two separate main sawmills in Keppetipola. Both of those sawmills have one main sawing machine, an edger cutter and a cross cutter. Ethgala and Melsiripura sawmills have two main sawing machines. The main sawing machine is used to convert saw logs into main pieces of slabs. Those pieces are put into the Edger machine for converting into sawn wood. That sawn wood is converted as standard measurements by using a cross-cutter machine.

2.3 Data collection

Keppetipola sawmill is dependent on upcountry forest plantations, particularly *Eucalyptus* species. The main plantation species are *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus microcorys*. Ninety per cent of hardwood saw logs, which are sawn in Kappetipola, are *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus microcorys*. Therefore, one target of this research is the identification of Conversion Loss (CL) with *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus microcorys*; thus, two types of data were collected: primary data and secondary data.

2.4 Primary data collection

Primary data was collected in two sequential steps: first, the calculation of log volumes, followed by the calculation of sawn wood volumes. Data collection involved the use of specific instruments, including a diameter tape and a meter tape. Using the diameter tape, the top, bottom, and mid-girth measurements of each saw log were recorded while the log length was measured with the meter tape. Before processing, visible defects in the saw logs were identified and documented. Once the saw logs were converted into sawn wood, the resulting cross-sections and lengths were measured again using the meter tape. All measurements and observations were systematically recorded to ensure accuracy and traceability throughout the data collection process.

2.5 Identification of Conversion Loss (CL)

Log length under bark diameter (top, middle and bottom) of each log was measured. In taking measurements, Logs were not discriminated as large logs and small logs and external visual defects were not considered to avoid errors. Log volume was calculated using the following Newton's formula (Equation 01) with the values of parameters collected (Caldera and Amarasekara, 2015).

$$\text{Log volume} = \pi L \frac{(d^2 + 4d_m^2 + d_b^2)}{240000} \quad (\text{Equation 01})$$

Log volume calculated in decimeters (dm³).

L = log length (meter)

d² = top diameter (centimeter)

d_m = mid diameter (centimeter)

d_b = bottom diameter (centimeter)

2.6 Calculation Sawn Timber (S/T) volume

Equation 02 was used to calculate Sawn Timber (S/T) volume. “Measure the cross-section volume and length of sawn wood soon after the sawing”. Then, equation two was applied and the S/T volume was estimated. (Caldera and Amarasekara, 2015)

$$(S/T) \text{ volume (dm}^3\text{)} = \frac{\text{Cross section (width} \times \text{thickness) (m)} \times \text{length (m)}}{1000} \quad (2)$$

2.7 Calculation Conversion Loss (CL) percentage

The loss in the conversion of each log was calculated as a percentage by using Equation 03 (Caldera and Amarasekara, 2015), which indicates the efficiency of the sawmill operators.

$$\text{CL \%} = \frac{\text{Log volume} - \text{volume of sawn timber}}{\text{Log volume}} \times 100 \quad (3)$$

Table 2 presents the details of the collected data for identifying the cutting load (CL) from three locations and their respective machines. At Kappetipola, data were collected from two machines: the Wood-Mizer LT 40, which processed 85 logs, and the Laimet circular saw, which processed 45 logs. At Ethgala, data came from two machines operating together, the Wood-Mizer LT 70 band saw and another saw, processing 125 logs in total. These data points provide insight into the volume and machine type involved in the sawmills' cutting processes, which is essential for analyzing operational efficiency and productivity. The Wood-Mizer LT 40 and LT 70 models are widely used band sawmills known for their ability to handle large log diameters and lengths with precise cutting capabilities, making them core equipment for timber processing in these locations.

Table 2. Details of collected data to identify the CL

Location	Machine	Number of logs
Kappetipola	Wood Mizer LT 40	85
Kappetipola	Laimet	45
Ethgala	Wood Mizer LT 70 and	125

2.8 Secondary data collection

Secondary data collection was done by using past production reports and investigation logbooks. The production logs book refers to the production details included in the production logbook. Saw log volume, details about sawn wood break down power and other details included and this book are maintained daily.

2.9 Compression of the CL of *Eucalyptus grandis* in the Nuwara Eliya region and the Bandarawela region

There is a difference in demand for logs between the Nuwara Eliya region and Bandarawela region. Therefore, the comparison was done randomly selected ten *Eucalyptus grandis* saw logs of the regions: Bandarawela and Nuwara Eliya. The top, middle and bottom girth and length of the saw log were measured. Those logs were broken down by using a

Wood-Mizer LT 40 machine, and data was collected soon after they were converted into sawn timber. Those details are included in Table 3.

Table 3 - The details of collected data of logs taken from the Nuwara Eliya region and Bandarawela region

Location	Machine	Species	Number of logs
Nuwara-Eliya	Wood-Mizer	<i>Eucalyptus grandis</i>	10
Bandarawela	Wood-Mizer	<i>Eucalyptus grandis</i>	10

2.10 Data collection of crew management

The sawmill crew is organized into five main categories: Depot Officer, Sawmill Supervisor, Saw Doctor, Sawyers, and Field Assistant. The Depot Officer is responsible for administrative and management tasks, including overseeing log and sawn wood inventories, issuing and receiving sawn timber, and managing financial transactions. The Sawmill Supervisor oversees the overall operations of the sawmill, handling all technical aspects and ensuring its smooth function. This role requires a strong technical background and the ability to make prompt decisions during mechanical or operational issues. The Saw Doctor oversees maintenance of the cutting equipment by sharpening saw blades, aligning saw teeth, and correcting any cutting inaccuracies to ensure optimal performance during timber conversion.

2.11 Data collection of the effect caused by the breakdown of the S/T production of Melsiripura sawmill

From five-month periods, data were collected in terms of several types, such as the main issues that break down production under power failure, breakdown of log supply machines, weak labour attendance, sawmill break down, and others. Those data were collected by investigating the sawmill logbook.

2.12 SWOT analysis

A SWOT analysis was conducted through a questionnaire answered by experts in the lumber industry. Summarizing their answers would involve grouping common themes into each quadrant and then finding a pivotal insight, such as a unique strength underutilized or a looming external threat that can direct focused action for the sawmill operations or the timber corporation's productivity enhancement.

3 Results

3.1 Identification conversion Loss of Kappetipola Wood Mizer LT -40

The converted volume of *Eucalyptus grandis* saw logs into sawn timber was 132165 dm³ by Wood Mizer LT40 in the Keppetipola sawmill in monthly. Results showed that timber volume is 62267dm³, lost volume is 62898 dm³, and the percentage is 47%. When we examined Figure 2, we noticed that the CL does not show an exact trend or pattern with the logs. There is a high incidence of irregularity observed from log to log. The reason for this irregularity is due to the individual characteristics of the logs, such as cracks, hollows, bends, maturity and rotten parts (Figure 1). Therefore, two logs of the same girth and length are likely to have different conversion losses.



Figure 1: Removable parts to manufacture quality-sawn wood

Table 4 includes results of how the behavior of CL of deferent types of species in Wood Mizer LT-40 is Keppetipola sawmill. *Pinus caribaea* 32060 dm³ logs were converted into sawn timber. The result was 21175dm³, and the mean CL is 34%; *Eucalyptus grandis* 3162 dm³ logs were converted as S/T, the S/T amount was 1720 dm³, and the loss in conversion as a percentage is 47%.

Table 4. The mean production of other species in Keppetipola

Saw log species	Total saw logs volume dm ³	Total S/T volume dm ³	Total wastes timber volume dm ³	Mean CL parentage (%)
Wood Mizer LT 40 in Keppetipola				
<i>Pinus caribaea</i>	32060	21175	9085	34
<i>Eucalyptus microcorys</i>	3162	1720	1442	47
<i>Eucalyptus grandis</i>	132165	69267	62898	47
Laimet machine in Kappetipola				
<i>Eucalyptus grandis</i>	31467	18129	13338	42
<i>Eucalyptus microcorys</i>	11908	5247	6661	54
Wood Mizer LT 70 machine in Ethgala				
Mahogany	1896	1054	842	43

On examination of Figure 2, it is noticeable that conversion loss might have a relationship with the hardness of the wood. The harder the wood, the more CL occurs. *Eucalyptus microcorys* is a harder wood than *Eucalyptus grandis* and the CL of both species were 47%. Pine is not as hard as *Eucalyptus microcorys* or *Eucalyptus grandis*, and it is seen that CL pines is 34%.

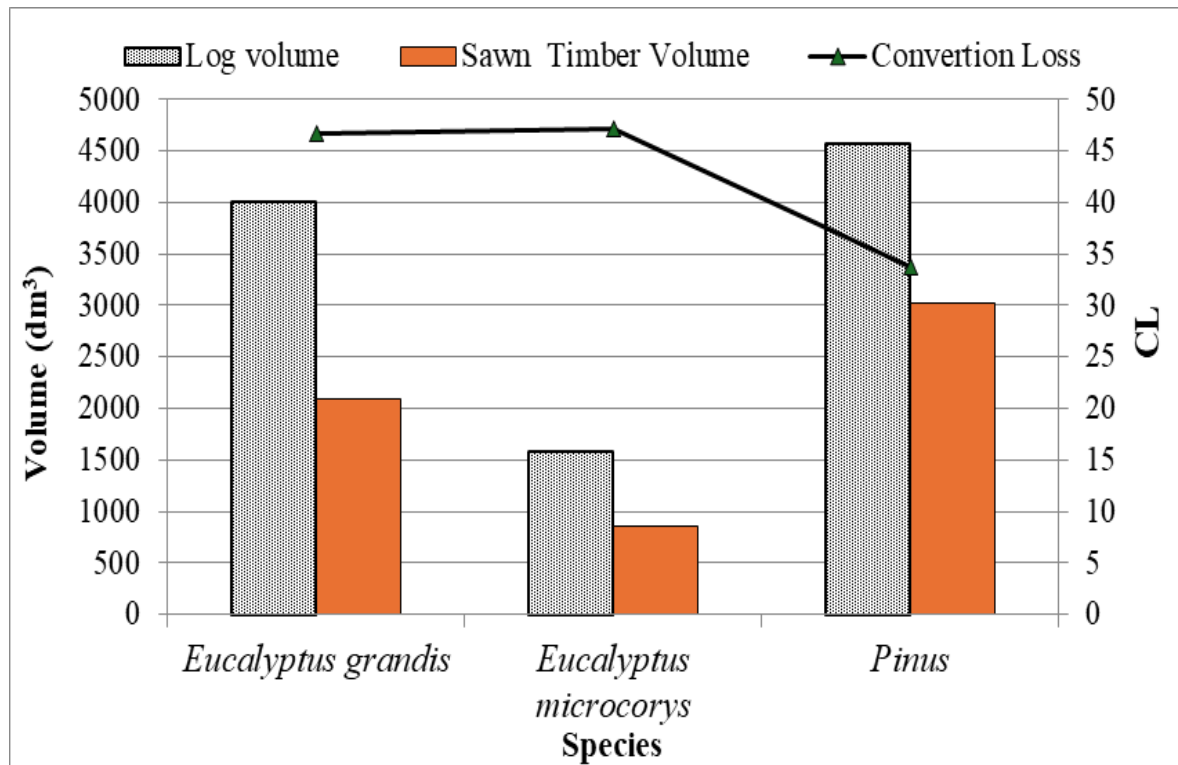


Figure 2. The difference of CL among different species in Wood-Mizer LT 40 Kappetipola

3.2 Identification of conversion Loss from Kappetipolla in the Laimet machine

Table 4 shows the production results of the Laimet machine in Keppetipola. When examining the percentages of conversion loss of the two types of woods, it is confirmed that the harder wood has a higher percentage of CL despite the change of cutting machine. CL depends on both the species and the type of sawing machine. It can be confirmed from the following chart that the Wood Mizer has more efficiency than the Laimet machine.

Figure 3 includes details of *Eucalyptus grandis* in Wood-Mizer LT 40 and *Eucalyptus grandis* logs in Laimet machine used to convert into sleepers. Those results in Table 4.4. CL percentage of Wood-Mizer LT 40 is 32% and in Laimet, it shows as 37%. Identification conversion Loss in Ethgala sawmill; this CL is lower than the CL detected in early research conducted by Caldera and Amarasekara (2015). According to his research, CL was 45.9%; this drop in CL percentage is due to the development of cutting methodology.

3.3 Difference of log quality based on site characteristics

Normal appearances of logs of mature trees of *Eucalyptus grandis* in Nuwara-Eliya are a little reddish, and immature logs are white in colour. Cutting face splits into two or three parts in a very short time; however, the mature logs in Bandarawela region are dark reddish in colour and immature logs are white mixed red colour. Some logs appear to have small strikes. Those strikes do not affect the yield of sawn wood. Both machines cut large cross-sectioned sawn wood; therefore, CL is a low amount. The comparison chart shows big differences in CL. Bandarawela region; *Eucalyptus grandis* saw log shows low splits, therefore CL is low, and nonetheless, in the Nuwara Eliya region, *Eucalyptus grandis* saw logs splitting is higher; therefore, conversion loss is very high.

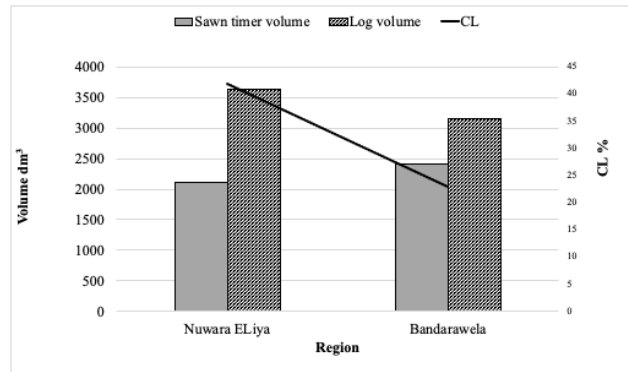


Figure 3. Comparison of *Eucalyptus grandis* logs conversion to sawn timber in Nuwara-Eliya and Bandarawela.

3.4 Crew Management training

The total crew management of the Ethgala sawmill is twelve. Two weeks training has been given to two Sawyers and two months training to one saw doctor; and chargehand who participated in three months training program. Others are untrained. The total crew at Kappetipolla sawmill is nineteen. Four of them had taken two-week training, two participated in three months training program, and one has two weeks training in Japan (Table 5).

Table 5. Details of Participated training programs

Name of the sawmill	Total of crew	Two weeks	Two Months	Three Months	Overseas Two weeks
Ethgala	12	02	01	01	-
Keppetipola	19	04	-	02	01
Melsiripura	11	-	-	02	-

The lowest and the highest working experience crews are found at Melsiripura depot. Those details are included in Figures 4 and 5.

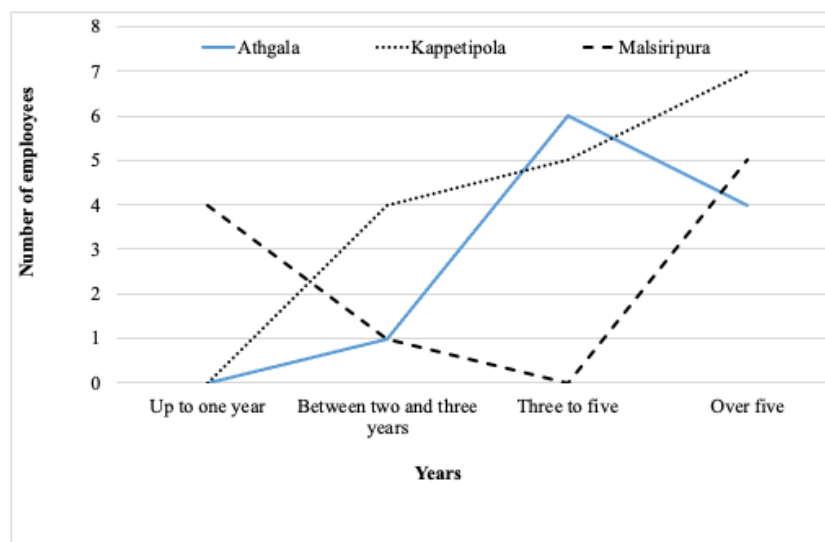


Figure 4: Working experience of the employees in year

3.5 Manpower behavior of Melsiripura sawmill

Eight hundred and fifty-two working hours were included in those five months. Sixty-nine hours were wasted due to the breakdown of the log supply machine. Thirty-two hours were wasted due to the weak labour attendance. Fifty hours were lost due to sawmill breakdown. A power failure caused the loss of forty-two hours. Twelve hours were wasted for other reasons. The total number of wasted hours is two hundred and five. Those details are included Table 6. The highest percentage of wasted time is due to the breakdown of the saw log supply machine. The amount of that percentage is thirty-four.

Table 6. The Manpower behavior of Melsiripura sawmill in 2024

Months	Working hours	Breakdown of log supply	Weak labour	Sawmill break	Power failure	Others	Total
January	192	11	8	16	0	-	35
February	160	0	0	8	0	-	8
March	168	34	8	0	32	-	74
April	156	8	8	6	10	-	32
September	176	16	8	20	0	12	44
Total	852	69	32	50	42	12	205

3.6 SWOT analysis

Strengths (internal positive factors) are a well-known brand name and committed employees. Weaknesses (internal, negative factors) are the insufficiency of saw logs to run the sawmill; The weakness of maintenance, mechanical, and engineering parts; Poor log handling in the sawmill; Poor stacking system; Limited financial resources; Very narrow product line; Limited distribution; Higher costs; Poor marketing skills; Under-trained employees. The main opportunities (external positive factors) are the Sri Lankan government-powered STC; therefore, STC has support from the State. Timber harvesting of all state forest plantations is conducted by STC, which is the sole legal body to manage the government's timber business. There are several Threats (external, negative factors), which are insufficiency of saw logs to sawmills; introduction of new substitutes; entry of foreign competitors; changing government policies; economic downturn; rival firms adopt new strategies; changing customer needs; and the condition of present saw logs.

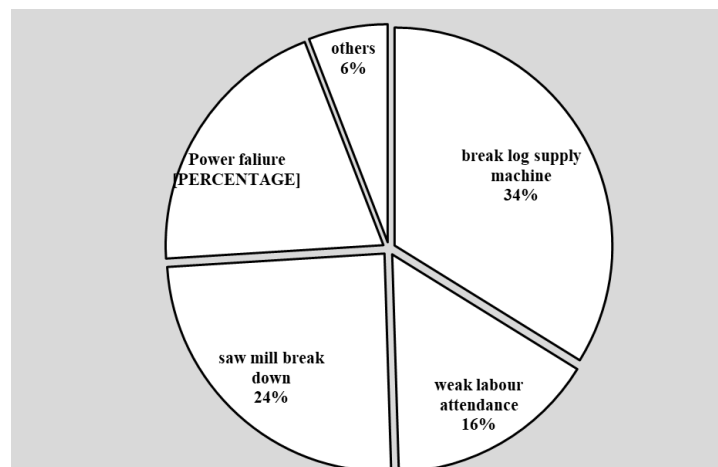


Figure 5. The Manpower behavior of Melsiripura sawmill in 2024 for five months.

3.7 Discussion

Investigation of STC history of sawn timber production shows that production decreased from fifteen thousand cubic meters to five thousand cubic meters in 1987. Never after that, had the final production of each year not risen above five thousand cubic meters (Ruwanpathirana, 2008). Sleepers are the main sawn timber product of STC. It was reduced by twenty per cent at an early stage. When collecting SWOT analysis data, it was understood that ninety per cent of STC crew were committed to developing sawn timber production of STC, and one hundred per cent of customers of STC have been trusting about the standard quality of STC lumber products. From 2000 to 2017, sawn timber production declined by 49%. It shows that all sawmills are not running in full capacity. If STC sawmills have enough saw logs on time, production can be increased to 4562m³ under the current situation (Bumgardner and Benedetti, 2022).

Conversion loss of *Eucalyptus grandis* in the Kappetipola Wood Mizer LT-40 sawmill was 42 %. Softwood and hardwood make a great difference in conversion loss. *Eucalyptus microcorys* is a hardwood timber that suffers a conversion loss of 47%. In *Pinus caribaea*, conversion loss is 32 % (Mo, 2024). After all preservation treatment is done, Pines sawn wood can be used for all type of light construction. STC always tries to produce standard sawn timber for the market. For making good quality timber, STC has to remove even little defect parts of logs. In private sawmills, they do not consider much of sawn wood quality and the standard measurements, therefore conversion loss of private sawmills is less than STC.

The CL of *Eucalyptus grandis* in Wood Mizer; the highest CL is 47%, while the lowest percentage is 23 % and the mean is 35 %. The main reason for conversion loss increase is due to higher splitting of *Eucalyptus grandis* logs vastly. When we examined the bar graphs, we noticed that the CL line did not become regular. There is a high incidence of irregularity observed from log to log. The reason for this irregularity is due to qualities of individual logs. Quality defects such as many knots per meter, bend fraction, hollow position, presence of buttresses and presence of heart rot were found to have a significant influence on the price of teak logs (Jayawardhane et al., 2016). Higher occurrences of log defects can be attributed to growing area, site characteristics and differences in proper management of timber stands. Therefore, two logs of the same girth and length are likely to have different conversion losses. Moreover, soil conditions, weather and climate conditions directly affect tree growth. Under good, suitable weather and soil condition, a forest plantation produces a higher final timber yield. Therefore, forest officers should always have good experience in managing forest plantations. Diseases and pest attacks are done severe damage and final timber yield fall very low amount in present. Thus, STC sawmills do not have sufficient logs without defects.

During the harvesting period, improper tree falling techniques used by chain saw operators might cause felling at the wrong angle with the ground terrain, not using relevant felling cuts at the right time and right angle and place. Chain saw machines are sometimes poor in sharpness and other conditions.

After the Civil War, the North and East Teak plantations begun to harvest. The bullets had damaged those plantations. Scanning of the bullets has been difficult due to the lack of sophisticated machinery in Sri Lanka. Iron metals, wires, nails, and bullets are hidden in raw logs. Those are difficult to identify by normal vision; thus, the iron parts of the sawing machine have caused vast damage to the saw blades. Therefore, a metal detector or scanning machine needs to be introduced to Sri Lankan sawmills. In developed countries, all saw logs are investigated through the scanner machines.

When sawing wood for making standard measurements and when using wood for making furniture, many small sawn wood parts are removed without being used. In Malaysian wood

industry, those wooden parts are joint again using and converted into valuable, different type of wooden products. STC also established a finger joint machine in Boossa STC timber complex and produced finger-jointed furniture and partition boards to reduce wood waste (Muthumala et al., 2025).

Sawdust is used to manufacture electric power in Trincomalee and Batheleyaya in Giradurukotte. Two Dendro powerhouses are situated in different places in Sri Lanka. In the upcountry, sawdust is used to make power for drying tea leaves in tea factories. After sawdust is changed to ash, it is used to make fertilizer and cement. Therefore, nowadays, sawdust is very useful for generating power as well as a fuel. Presently, sawdust is not disposed of in the environment without being used.

There are nineteen members in the crew working in Kappetipola two sawmills. Those two sawmills can be joint as one separate sawmill. Then, it is possible to remove one edger cutter and one cross cutter with two operators. It can also reduce the extra production cost. Kappetipla Laimet machine is a relatively old machine, which has a CL of 5% more than the Wood Mizer machine when converting sleepers by *Eucalyptus grandis*. Besides, it is advisable to replace most advance Wood Mizer band-sawing machine instead of Limate circular machine. Kapetipola sawmills have no facility to break down saw logs over forty of mid girth. The new machine to be established must have the ability to convert over sixty centimeters mid diameter saw logs as sawn timber.

3.8 Suggestions

The two sawmills of Kapptipola depot joint as one separate mill, one edger cutter machine, and one cross cutter machine with two operators. Added new high-quality band saw that machine could cut saw logs over sixty centimeters mid diameter. The Spices of *Pinus caribaea* was taken 32 % of CL. Therefore, *Pinus caribaea* can introduce the wood industry after wood treatment, then STC can be able to fulfil the sawn timber shortage gap in Sri Lanka. STC needs to introduce timber scanner machines and metal detector machines for all sawmills. Most developed countries apply finger joint techniques in wooden industries; STC should apply the finger joint technique as an effective way to reduce the CL of all sawmills of STC. STC can buy private land to saw logs to fill up gap of *Eucalyptus grandis*. In such a situation, it is suitable to give more priority to the Bandarawela region to purchase logs from private land.

4 Conclusion

- Sawn timber production is determined by three factors, namely the quality of the timber used, the condition of sawmills and the skillfulness of the staff. A detailed study of each part will take time due to complexity. Conversion loss always varies with the type of the machine, sawn timber cross-section, species, and condition of the logs.
- It was found that band saw shows the least conversion loss. The production percentage is also caused by the thickness of the saw blade, the angle of setting and the sharpness of the cutting edge. *Eucalyptus grandis* has shown 32 % conversion loss and 37 % conversion loss in Wood Mizer LT-40 and Laimet, respectively, in sleeper production. The production of other common measurements (50cm*100cm and 75cm*100cm) by *Eucalyptus grandis* has shown 47 % in both Wood Mizer LT-40 and in Laimet. The conversion losses of *Eucalyptus microcorys* in Wood Mizer LT- 40 and Laimet are 47 % and 54 % respectively, during the production of common measurements of sawn timber (50cm*100cm and 75cm*100cm).

- Pinus has the least conversion loss among the tested species, which has shown conversion loss 34 %. In comparison of *Eucalyptus grandis* in Bandarawela region with the Nuwara-Eliya region, it was found that the conversion loss of the Bandarawela region is lower than Nuwara-Eliya region due to less splitting of logs.
- The conversion loss of STC sawmills is greater than private sawmill due to several reasons mainly, STC maintains proper standards: measurements and removes defects as much as possible. SWOT analysis shows that the unavailability of continuous log supply, frequent breakdowns and absence of permanent skilled labourers are the major drawbacks of STC sawmills.
- As well as supply of defected logs is another key weakness to decline the sawn timber production and increasing conversion loss. Addressing these key weaknesses will help increase STC's sawn timber production.

Author Contributions

MGP Bandara: Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review and editing. **CK Muthumala:** Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review and editing. **WVTD Amarasinghe:** Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review and editing. **FMMT Marikar:** Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review and editing.

Funding statement

No financial support was received for the study.

Conflict of interest

We confirm that there is no conflict of interest.

Reference

- Bumgardner, M. and Benedetti, D., (2022). Sawn hardwood. In: Forest Products: Annual Market Review 2021-2022. Geneva: United Nations, Food and Agriculture Organization: 18-53. Chapter 3., pp.18-53.
- Caldera, H.T.S. and Amarasekera, H.S., (2015). Investigation of sawmill management and technology on waste reduction at selected sawmills in Moratuwa, Sri Lanka, *Journal of Tropical Forestry and Environment*, 5(1), 71-86.
- Chandrasiri, M.V., Gamage, G.C.L. and Anuruddha, N.H.T., (2022). A study of the historical variables that took place in Hinidumpattu during the British era.
- Chen, W. and Chao, F., (2021). Multiple engineering analyses in exploring cutting marks of the Rip Saw. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 10(2), 72-78, DOI: [10.18178/ijmerr.10.2.72-78](https://doi.org/10.18178/ijmerr.10.2.72-78)
- Daigneault, A., Baker, J.S., Guo, J., Lauri, P., Favero, A., Forsell, N., Johnston, C., Ohrel, S.B. and Sohngen, B., (2022). How the future of the global forest sink depends on timber demand, forest management, and carbon policies, *Global Environmental Change*, 76, p.102582, DOI: [10.1016/j.gloenvcha.2022.102582](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102582)

- Gamage, S.N., Groves, C.P., Marikar, F.M.M.T., Turner, C.S., Padmalal, K.U.K.G. and Kotagama, S.W., (2017). The taxonomy, distribution, and conservation status of the slender loris (Primates, Lorisidae: Loris) in Sri Lanka, *Primate Conservation*, 31(1), 83-106.
- Jayawardhane, J.K.P.C., Perera, P.K.P., Lokupitiya, R.S., Amarasekara, H.S. and Ruwanpathirana, N., (2016). The effect of quality attributes in determination of price for plantation-grown Teak (*Tectona grandis*) logs in Sri Lanka, *Annals of Forest Research*, 59(1), 105-116.
- Mensah, P., Pimenta, A.S., de Melo, R.R., Amponsah, J., Tuo, G., Chakurah, I., Ampadu, S.D., Buckman, I., Nikoi, M., Minkah, E. and Miranda, N.D.O., (2025). The global supply chain of wood products: a literature review, *Forests*, 16(7), 1036, DOI: [10.3390/f16071036](https://doi.org/10.3390/f16071036)
- Mo, J., (2024). *Development of Innovative Hardwood Products* (Doctoral dissertation, Purdue University Graduate School)
- Muthumala, C.K. and Amarasekara, H.S., (2013). Investigation the authenticity of local and imported timber species in Sri Lanka, Proceeding of the International Forestry and Environment Symposium, Department of Forestry and Environmental Science, University of Sri Jayewardenepura, 95.
- Muthumala, C. K., De Silva, Sudhira, Alwis, P.L.A.G., Arunakumara, K.K.I.U. and Marikar, F.M.M.T. (2025). Assessment of quality parameters of finger-jointed timber products: A review, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series II: Forestry Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 18(67), 65-82, DOI: [10.31926/but.fwiafe.2025.18.67.1.5](https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2025.18.67.1.5)
- Peiris, H.M.P. and Gunarathne, N., (2021). The changing landscape of the plantation sector in the central highlands of Sri Lanka. In Mountain landscapes in transition: Effects of land use and climate change (pp. 539-554). Cham: Springer International Publishing.
- Premakantha, K.T., Chandani, R.P.D.S., Kingsly, S.A.D., Dias, H.U. and Kekulandara, N.S.B., (2021). Forest cover assessment in Sri Lanka using high resolution satellite images. *The Sri Lanka Forester*, 40, 1-16.
- Rasheed, R., Javed, H., Rizwan, A., Afzaal, M. and Ahmad, S.R., (2023). Eco-sustainability analysis of precast-concrete utility poles manufacturing—A case study from Pakistan. *Heliyon*, 9(4), e14976, DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e14976](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14976)
- Ruwanpathirana, N., (2008). Timber Utilization in Sri Lanka. In Proceedings of International Forestry and Environment Symposium.
- Sivakumar, S.S., (2021). Water resources and agriculture development strategy and approach for the re-emerging development of conflict affected regions of Sri Lanka.
- Tsegay, G. and Meng, X.Z., (2021). Impact of ex-closure in above and below ground carbon stock biomass. *Forests*, 12(2), 130, DOI: [10.3390/f12020130](https://doi.org/10.3390/f12020130)
- Tshavhungwe, V. and Grobbelaar, S., (2024). Sawmilling competitiveness from the perspective of industry competitiveness models: a review. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 86(1), 2-14, DOI: [10.2989/20702620.2023.2293906](https://doi.org/10.2989/20702620.2023.2293906)



Alçak yoğunluklu polietilen ve yüksek yoğunluklu polietilen karışımının bazı fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine atık MDF tozunun etkisi

Bekir Cihad Bal^{1*} 

ÖZ: Odun plastik kompozitlerin (OPK) üretilmesinde, endüstriyel atıkların kullanımı üzerine yapılan bilimsel çalışmalar son yıllarda artmıştır. Geri dönüşüm konusuna bazı ülkelerin daha fazla önem vermesi bu ilgiyi artırmıştır. Özellikle Türkiye’de başlatılan sıfır atık projesi kapsamında, endüstriyel atıkların yeniden değerlendirilmesi ve ekonomiye kazandırılması konusundaki çalışmalar ilgi çekmektedir. Bu noktadan hareketle, bu çalışmada, mobilya fabrikalarında oluşan atık orta yoğunluklu lif levha (MDF) tozunun dolgu maddesi olarak odun-plastik kompozit malzemelerin üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, geri dönüştürülmüş alçak yoğunluklu polietilen (G-AYPE) ile yeni yüksek yoğunluklu polietilen (Y-YYPE) karışımına %10, %25 ve %40 oranlarında MDF tozu eklenerek odun plastik kompozit plakalar başarılı şekilde üretilmiştir. G-AYPE ile Y-YYPE polimerlerin karışımı ekstruder makinesinde homojen bir şekilde yapılmıştır. Elde edilen kompozitlerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen verilere göre; kompozit içerisindeki dolgu maddesi oranı arttıkça, eğilme direnci, eğilmede deformasyon, çekme direnci, kopmada uzama, kalıplama daralması ve doğrusal termal genleşme katsayısı azalmıştır. Ancak, bunun aksine yoğunluk, eğilmede elastikiyet ve çekmede elastikiyet artmıştır.

Anahtar kelimeler: OPK, Mekanik özellikler, MDF tozu, Mobilya fabrikası atıkları

Effect of waste MDF powder on some physical and mechanical properties of blend of low density polyethylene and high density polyethylene

ABSTRACT: Scientific studies on the use of industrial waste in the production of wood-plastic composites (WPCs) have increased in recent years. The increased emphasis placed on recycling in some countries has increased this interest. Studies on the reuse and economic recovery of industrial waste, particularly within the scope of the zero waste project launched in Turkey, are attracting significant interest. Based on this perspective, this study investigated the utilization of waste Medium Density Fiberboard (MDF) dust generated in furniture factories as a filler in the production of wood-plastic composite materials. In the study, wood-plastic composite panels were successfully produced by adding 10%, 25%, and 40% MDF dust to a blend of recycled low-density polyethylene (R-LDPE) and virgin high-density polyethylene (V-HDPE). The blend of R-LDPE and V-HDPE polymers was made homogeneously in the extruder machine. Some physical and mechanical properties of the resulting composites were investigated. According to the obtained data, as the amount of filler in the composite increased, the flexural strength, deformation at bending, tensile strength, elongation at break, molding shrinkage, and coefficient of linear thermal expansion decreased. However, on the contrary, density, flexural modulus and tensile modulus increased.

Keywords: WPC, Mechanical properties, MDF dust, Furniture factory waste

Makale tarihçesi: Geliş:16.10.2025, Düzeltme: 30.11.2025, Kabul:01.12.2025, Yayınlanma:03.12.2025, *bcbal@hotmail.com

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Malzeme Bölümü, Kahramanmaraş/Türkiye.

Atıf: Bal B.C., (2025), Düşük yoğunluklu polietilen ve yüksek yoğunluklu polietilen karışımının bazı fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine atık MDF tozunun etkisi, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 8(2), 321-333, DOI: [10.33725/mamad.1804675](https://doi.org/10.33725/mamad.1804675)

1 Giriş

OPK üretiminde atık bazı malzemelerin dolgu maddesi olarak kullanılması geri dönüşümün amacına hizmet eden önemli bir konudur. Özellikle, OPK üretiminde kullanılan matris, geri dönüşümden elde edilen bir matris ise, bu durum geri dönüşüm amaçları için son derece önemlidir. Geri dönüşüm konusuna, bazı ülkeler daha fazla önem vermekte, atık malzemelerin geri dönüştürülmesi konusuna hem özel sektör ilgi göstermekte hem de bilimsel araştırma faaliyetleri bu yönde artış göstermektedir. Özellikle Türkiye’de 2017 yılında başlatılan sıfır atık projesi kapsamında, atıkların yeniden değerlendirilmesi ve ekonomiye kazandırılması konusundaki çalışmalar ilgi çekmektedir. Ayrıca, bu türden atıkların geri dönüştürülmesi ve yeni ürünlerin üretilmesi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinde *Sorumlu Tüketim ve Üretim* hedefi altında tanımlanmaktadır.

Araştırmacılar tarafından birçok atık malzeme dolgu maddesi olarak OPK üretiminde denenmiştir. Örneğin; Rosa ve ark., (2009) tarafından yapılan çalışmada, bir tarımsal atık olarak pirinç kabuğu unu dolgulu polipropilen (PP) esaslı odun plastik kompozit malzemeler üretilmiş ve bazı özellikleri test edilmiştir. Tufan ve ark., (2015) tarafından yapılan çalışmada atık kağıt bardaklar dolgu maddesi olarak kullanılmış ve YYPE ve PP esaslı odun plastik kompozitler üretilmiş ve bazı özellikleri araştırılmıştır. Sadık ve ark., (2021) geri dönüştürülmüş YYPE ve atık cam unu kullanarak kompozitler üretmiş ve üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Bhaskar ve ark., (2021) atık cam unu takviyeli polimer kompozitin bazı mekanik özelliklerini araştırmıştır. Kuzmin ve ark., (2024) tarafından arpa sapı ve araç lastiklerinden elde edilen atık kauçuk ile YYPE esaslı kompozit malzeme üretmiş ve bazı seçili özellikleri araştırılmıştır. Ayrılmış ve ark., (2025) tarafından atık cam unu ve arpa samanı takviyeli YYPE kompozitler üretilmiş ve bazı özellikleri araştırılmıştır. Taşdemir (2020) atık öğütülmüş ürefoormaldehit tozu dolgu maddesi olarak YYPE ile beraber kompozit üretiminde kullanmıştır. Bal (2023a) atık ceviz kabuğu unu ve odun unu ile doldurulmuş YYPE kompozitlerin bazı özellikleri araştırmıştır. Avella ve ark., (2009) atık aseptik karton kutu (Telra Pak) ile doldurulmuş YYPE esaslı kompozit levhaların bazı özelliklerini araştırmıştır. Ebadi ve ark., (2016 ve 2017) atık aseptik karton kutu ile doldurulmuş polietilen esaslı kompozit levhaların bazı teknolojik özelliklerini belirlemiştir. Mohareb ve ark., (2017) ve Hamouda ve ark., (2019) atık aseptik karton kutu kullanılarak üretilen kompozitlerin bazı mekanik özelliklerini ve çürüme direncini araştırmıştır. Bal (2023b) geri dönüştürülmüş polietilen kullanılan, atık cam unu ve odun unu ile doldurulan kompozitlerin bazı mekanik özelliklerini belirlemiştir. Bal ve Narlıoğlu (2024) geri dönüştürülmüş PP ve atık aseptik karton kutu ile kompozit malzeme üretmiş ve bazı seçili teknolojik özelliklerini belirlemişlerdir.

Bu yapılan çalışmaların yayında, mobilya fabrikalarında üretim esnasında oluşan atık MDF tozunun OPK üretiminde dolgu maddesi olarak kullanıldığı bazı çalışmalarda yapılmıştır. Örneğin; Chavooshi ve Madhoushi (2013) farklı seviyelerdeki MDF tozu ve alüminyum tozu ile kompozit malzeme üretmişler ve bu kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Altuntaş ve ark., (2016) tarafından AYPE ile MDF tozu ile beraber kompozit üretilmiş ve Bor bileşiklerinin kullanımının kompozitin yangına karşı dayanımı araştırılmıştır. Altuntaş ve ark., (2017a) tarafından, PP ve atık MDF tozu ile üretilmiş OPK üzerinde farklı yangın geciktirici bileşiklerin ve çinko boratın sinerjik etkileri araştırılmıştır. Altuntaş ve ark., (2017b), yüksek oranda (%40-70) odun lifi dolgu maddesi kullanımının odun plastik kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisinin araştırmışlardır. Bir başka çalışmada Chavooshi ve ark., (2014) tarafından, atık MDF tozu ve PP ile üretilen kompozitlerin bazı özellikleri üzerine, malzeme karıştırma yönteminin ve dolgu maddesi

içeriğinin etkisi araştırılmıştır. Özmen ve ark., (2014) tarafından, PP ve %10 ile %50 arasında atık MDF tozu kullanılarak kompozitler üretilmiş ve odun unu ile doldurulmuş test örnekleri karşılaştırılmıştır. Bir başka çalışmada ise, Güler ve Doğan (2022) MDF fabrikalarında, zımparalama bölümünde oluşan MDF tozu atıklarının, MDF üretiminde kullanımını araştırmışlar ve bu atıklarının MDF üretiminde değerlendirilmesinin mümkün olduğunu bildirmişlerdir.

Yapılan önceki çalışmalarda, G-AYPE ve Y-YYPE karışımı ile üretilen kompozitin özellikleri araştırılmış ancak, bu karışımın bazı özellikleri üzerine MDF tozunun etkisi araştırılmamıştır. Bu noktadan hareketle, bu çalışmanın amacı; G-AYPE ve Y-YYPE karışımının seçili özelliklerini ve ayrıca MDF tozunun dolgu maddesi olarak bu karışımın bazı özellikleri üzerine etkisini araştırmaktır.

2 Materyal ve Metot

2.1 Materyal

Bu çalışmada polimer matris olarak, geri dönüşümden elde edilmiş alçak yoğunluklu polietilen (G-AYPE) kullanılmıştır. G-AYPE özel bir işletme olan Vepsan plastik San. ve Tic. LTD firmasından satın alma yolu ile elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan yeni yüksek yoğunluklu polietilen (Y-YYPE) ise PETKİM firmasının ürünüdür.

Çalışmada kullanılan MDF tozu mobilya üretimi yapılan bir iş yerinden temin edilmiştir. MDF tozu önce 40 mesh elekten elenmiş ve elek altına geçen tüm partiküller kullanılmıştır. Odun-plastik kompozit malzeme üretilirken içerisine başka bir malzeme eklenmemiştir.

Odun plastik kompozit levhalar üretilirken 6 farklı grup oluşturulmuştur. Sadece G-AYPE kullanılan grup, sadece Y-YYPE kullanılan grup, bu iki polimerin %50 oranında karışımı olan grup ve MDF tozu oranı ağırlık hesabına göre %10, %25 ve %40 dolgu maddesi olarak katılan gruplar olmak üzere 6 grup oluşturulmuştur (Tablo 1). Bu çalışmada, G-AYPE'nin çoğu kullanım alanı için düşük mekanik performansa sahip olması nedeniyle Y-YYPE karışıma güçlendirmek için eklenmiştir.

MDF tozu ise, endüstriyel bir atık olması nedeniyle, OPK üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. 40 mesh altındaki tüm partiküllerin kullanılmasının nedeni ise, bu atık malzemenin büyük bir bölümünün kullanılmasının amaçlanmasıdır.

Tablo 1. Kompozitlerin karışım oranları (%)

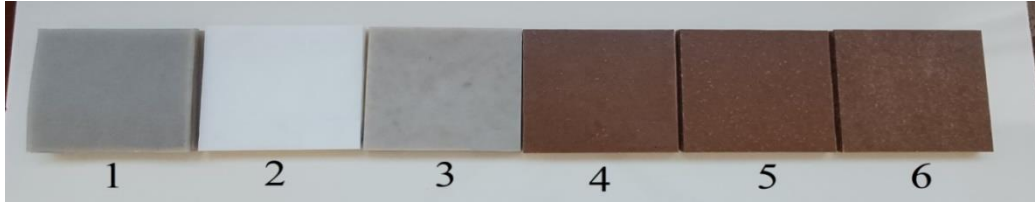
İçerik	Gruplar					
	1	2	3	4	5	6
G-AYPE (%)	100	0	50	45	37.5	30
T-YYPE (%)	0	100	50	45	37.5	30
MDF tozu (%)	0	0	0	10	25	40

2.2 Kompozitlerin üretilmesi

MDF tozu ile polimer, bir kaptaki karıştırıldı ve daha sonra, karışım namlu sıcaklığı 165, 175 ve 190 °C sıcaklıklardaki tek vidalı ekstruder ile karıştırıldı. Karışım, ekstruder çıkışındaki 3 mm çaplı bir nozuldan iplik halinde alındı ve bir masa üzerinde soğumaya bırakıldı. Daha sonra, bu malzeme kesildi ve küçük peletler elde edildi. Homojen bir karışım elde etmek için, malzeme ekstruderde iki kez işlendi. Daha sonra, bu peletler tekrar ekstruderden geçirildi, masa üzerinde tekrar soğutuldu ve tekrar kırılarak küçük peletler elde edildi. Bu peletler metal bir kalıba bırakıldı ve kalıpla beraber 180°C sıcaklıktaki elektrikle ısıtılan bir sıcak prese

yerleştirildi. Yapışmayı önlemek için yapışmaz pişirme kağıdı kullanıldı. Peletler 5 ton basınç altında ve 12 dakikalık bir süre boyunca ısıtıldı ve eritildi. Bu sürenin sonunda erimiş karışım metal kalıpla birlikte sıcak presten alınarak hemen soğuk prese yerleştirildi. Soğuk preste 5 dakika boyunca toplam 10 ton basınç uygulandı ve bu şekilde soğutuldu. Kompozit plakaların üretiminde ASTM D4703 numaralı standartta belirtilen usullere uyuldu ve bu standartta belirtilen Tip 2’de açıklanan kalıp sistemi (Flash-Type Mold) kullanıldı.

Soğuk presleme işleminden sonra kompozit levha metal kalıptan çıkarıldı ve yaklaşık olarak 3.5x175x175 mm (kalınlık x genişlik x uzunluk) ölçülerinde kompozit levha elde edildi. Her grup için 5 adet kompozit levha üretildi. Bu çalışma için toplam 30 adet levha üretildi (Şekil 1). Bu levhalardan deney numuneleri hazırlandı. Eğilme deneyi için her levhadan 3 adet deney numunesi kesildi. Çekme deneyi için ise her levhadan 2 adet deney numunesi hazırlandı. Deney numuneleri laboratuvar tipi şerit testere kullanılarak kesildi. Çekme deneyi için hazırlanan her bir deney numunesinin kenarları CNC freze ile şekillendirildi. Test örnekleri hazırlandıktan sonra oda şartlarında 2 hafta bekletildi ve sonra testleri yapıldı.



Şekil 1. Üretilen kompozit levhaların görüntüsü

2.3 Metot

2.3.1 Yoğunluk, kalıplama daralması ve doğrusal ısı genleşme katsayısı

Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk değerleri, ASTM 792 da belirtilen şekilde yapılmıştır. Test örneklerinin normal şartlarda ölçülen ağırlığı, suda ölçülen hacmine bölünerek yoğunluklar hesaplanmıştır. Yoğunluk hesabı aşağıdaki formülle (1) yapılmıştır.

$$d = M/V \quad (1)$$

Burada: d: yoğunluk (g/cm³), M: test örneğinin ağırlığı (g), V: test örneğinin sudaki hacmi (cm³)

Kalıplama daralması, kompozit plakalar üretilirken kullanılan kalıbın iç ölçüleri ile üretilen kompozit plakanın genişlik ölçüsüne oranlanması ile aşağıdaki formül (2) ile hesaplanmıştır.

$$\beta_k = ((G_k - G_p) / G_k) \times 100 \quad (2)$$

Burada: β_k : kalıplama daralması (%), G_k : kalıp iç genişliği (mm), G_p : plaka dış genişliği (mm)

Doğrusal ısı genleşme katsayısının (α_L) belirlenmesi için, öncelikle test örnekleri -12±2 °C ye kadar buzlukta soğutulmuştur. Test örnekleri buzlukta tek tek çıkarılarak soğuk haldeki uzunluk ölçüleri hemen alınmıştır. Daha sonra, test örnekleri +60 °C ye kadar kurutma fırınında ısıtılmış ve fırından tek tek çıkarılarak sıcak haldeki ölçüleri hemen alınmıştır. Isıtma sonucunda uzunluğunda meydana gelen artış miktarı ile α_L hesaplanmıştır. α_L , malzemenin sıcaklığının 1°C artması ile boyutunda meydana gelen uzama miktarını gösteren bir katsayıdır. α_L aşağıdaki formülle (3) hesaplanmıştır.

$$\alpha_L = d_L / (L_1 \times d_t) \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

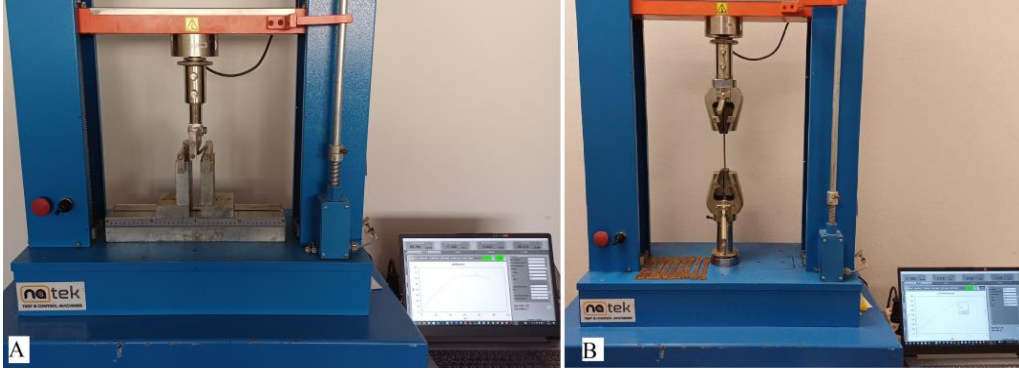
Burada; d_L sıcaklık ile meydana gelen uzama miktarı (mm), d_t sıcaklık farkı (°C), L_1 ise ilk uzunluktur (mm). α_L değeri çok küçük olduğu için “x10⁻⁵” şeklinde gösterilmiştir.

2.3.2 Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Kompozit malzemelerin eğilme direnci testleri ASTM D 790 ve çekme direnci testleri ASTM D638'e göre yapılmıştır. Mekanik testler, 1 ton kapasiteli, elektromekanik prensiple çalışan universal test makinesinde yapılmıştır (Şekil 2).

Eğilme direnci testinde, her grup için 15 test örneği üzerinde ölçüm yapılmıştır. Eğilme direnci testinde, ön yük 5 N, mesnet açıklığı 56 mm, test hızı 2 mm/dk, test sonu ise ölçülen maksimum kuvvetin %75'i olarak ayarlanmıştır. Eğilme direnci testi esnasında elde edilen yük ve yer değiştirme verileri ile yük-deformasyon grafikleri oluşturulmuştur. Eğilme direnci testinde, test sonundaki maksimum deformasyon değeri, eğilmede deformasyon olarak kaydedilmiş ve çizelgelerde gösterilmiştir. Eğilme testi esnasında elastikiyet modülü değerleri de hesaplanarak ilgili çizelgede verilmiştir.

Çekme testi her grupta 10 test örneği üzerinde yapılmıştır. Çekme testi esnasında ön yük 5 N ve test hızı 2 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Çekme testi esnasında elde edilen mukavemet ve yüzde uzama verileri ile mukavemet-uzama grafikleri elde edilmiştir. Çekme testi sonunda kopmada uzama değerleri kaydedilmiş ve ilgili çizelgede gösterilmiştir. Çekme testi esnasında elastikiyet modülü değerleri de hesaplanarak çizelgelerde verilmiştir.



Şekil 2. Eğilme testleri (A) ve çekme testlerinin yapılması (B)

2.3.3 İstatistik hesaplarının yapılması

Testler sonunda elde edilen veriler excel programına kaydedilmiş ve gruplar arasında fark olup olmadığı SPSS programında One-Way ANOVA testi ile belirlenmiştir. Gruplar arasında istatistiksel bir fark belirlenen gruplar için Duncan testi ile birbirlerinden farklılık gösteren gruplar belirlenmiştir. Elde edilen istatistik sonuçları çizelgelerde verilmiştir.

3 Bulgular ve Tartışma

Yoğunluk testine ait bulgular, gruplar arasında fark olup olmadığını gösteren ANOVA testi sonuçları ve hangi grupların birbirlerinden farklı olduğunu gösteren Duncan testi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Tabloda verilen yoğunluk değerleri incelendiğinde en düşük yoğunluk grup 1'de 920 kg/m^3 (%100 G-AYPE içeren grup) ve en yüksek ise grup 6'da (%30 G-AYPE + %30 Y-YYPE + %40 MDF tozu içeren grup) 1059 kg/m^3 olarak ölçülmüştür. Gruplar arasındaki yoğunluk farklılıkları istatistiksel olarak önemlidir ($P < 0.001$) ve ayrıca Duncan testine göre tüm grupların yoğunlukları birbirlerinden farklıdır. Grup 3, grup 1 ile grup 2'nin karışımı ile oluşturulan gruptur ve bu iki grubun yoğunluk değerlerinin ortalamasına çok yakın yoğunluk değeri ölçülmüştür (935 kg/m^3). Bu durum aslında, grup 3'de polimer malzemenin homojen şekilde karıştığını göstermektedir. Yapılan önceki çalışmalarda da, G-AYPE ve Y-YYPE polimerlerin karışımının, yoğunluk olarak ortalama bir değer verdiği rapor

edilmiştir (Akdoğan 2020). Ayrıca, MDF tozu dolgu oranı arttıkça yoğunluk değeri de artmıştır. Bunun en önemli nedeni, MDF tozunu oluşturan odun hücre çeperinin yoğunluğunun (yaklaşık 1500 kg/m³) polimerin yoğunluğundan daha yüksek olmasıdır. Yüksek pres basıncı ile odun hücrelerindeki boşluklar kapanmakta ve hücre çeperi yoğunluğuna yakın bir yoğunluk oluşmaktadır. Sunulan bu çalışmada elde edilen yoğunluk değerleri ile ilgili sonuçlara benzer sonuçlar, mobilya fabrikası atıklarının dolgu maddesi olarak kullanıldığı bir çalışma ile benzerdir (Mengeloğlu ve ark. 2015). Ancak, yapılan bir başka çalışmada ise MDF tozu oranı arttıkça, yoğunluğun azaldığı rapor edilmiştir. MDF tozu oranı %40 iken kompozit yoğunluğu 840 kg/m³ ve %50 iken 830 kg/m³ olarak ölçülmüştür (Chavooshi ve Madhoushi, 2013). Ancak, bu farklı sonuç elde edilen çalışmada kompozit malzeme ekstruder kullanılmadan üretilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada alüminyum tozu diğer dolgu maddesi olarak ve MAPP kullanılmıştır. Bu nedenle, kompozitin bileşenlerinin yeterince karışmadığı ve içerisinde fazlaca mikro boşlukların kaldığı açıktır. Bu durumun bir diğer açıklaması ise; odun plastik kompozitler konusunda yapılan önceki çalışmalarda da dolgu maddesinin miktarı arttıkça kompozit malzemenin yoğunluğunun arttığı yönünde bildirilen çalışmalardır (Matuana and Stark 2015; Çavuş 2020; Bal 2023b, Bal ve ark., 2023).

Tablo 2. Yoğunluk testine ait bulgular, ANOVA önem düzeyi ve Duncan testi sonuçları

Yoğunluk (kg/m ³)	Gruplar						P değeri
	1	2	3	4	5	6	
$\bar{x}$	920 A	952 B	935 C	964 D	1010 E	1059 F	P<0.001
ss	3.0	4.0	2.5	3.2	5.6	6.9	

$\bar{x}$: aritmetik ortalama, ss: standart sapma, *Duncan testi sonuçları büyük harfle gösterilmiş ve küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır.

Kalıplama daralması testlerine ait bulgular, ANOVA testi önem düzeyi ve Duncan testi sonuçları Tablo 3’de verilmiştir. En küçük kalıplama daralması grup 6’da %1.37 ve büyük kalıplama daralması ise grup 1’de %3.49 olarak ölçülmüştür. Kalıplama daralması kompozit içeriğindeki dolgu maddesi miktarı arttıkça azalmıştır. Grup 1, 2 ve 3 arasında (dolgu maddesi kullanılmayan gruplar) istatistiksel olarak bir farklılık yoktur, ancak, dolgu maddesi kullanılan gruplarla ve grup 4 ve 5 ile grup 6 arasında önemli farklılık vardır. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde dolgu maddesi miktarı arttıkça kalıplama daralması azalmıştır. Bu konuda yapılan önceki çalışmalarda da benzer sonuçlar rapor edilmiştir. Yazıcıoğlu ve Borat (2018) tarafından, plastik polimerlere dolgu ya da takviye malzemesi eklenmesinin kalıplama daralmasını azalttığını bildirmiştir. Stark ve Berger (1997) kalıplama daralmasının, dolgu maddesi miktarının artmasıyla azaldığını rapor etmiştir. Yaptığı çalışmada kullandığı 4 farklı odun unu dolgu maddesi için, dolgu maddesi içeriğindeki her %10’luk artışta genel olarak %1,3 oranında kalıplama daralmasının azaldığını bildirmiştir. Ancak, bu çalışmada polimer matris PP’dir. Sunulan çalışmada ise PE kullanılmıştır. PE malzemenin PP malzemeye göre kalıplama daralması daha fazladır. Revilla-Díaz (2007) tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar rapor edilmiştir.

Tablo 3. Kalıplama daralması bulguları (%), ANOVA önem düzeyi ve Duncan testi sonuçları

(%)	Gruplar						P değeri
	1	2	3	4	5	6	
$\bar{x}$	3.49 C	3.15 C	3.27 C	2.22 B	2.05 B	1.37 A	P<0.001
ss	0.23	0.46	0.35	0.17	0.11	0.18	

$\bar{x}$: aritmetik ortalama, ss: standart sapma, *Duncan testi sonuçları büyük harfle gösterilmiş ve küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır.

Doğrusal ısı genleşme katsayısı verileri, ANOVA testi ve Duncan testi sonuçları Tablo 4’de verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde, ısı genleşme katsayısı en büyük grup 1’de 15.0×10^{-5} ve küçük grup 6’da 8.1×10^{-5} ölçülmüştür. Diğer grupların ısı genleşme katsayıları bu değerler arasında yer almıştır. Gruplar arasında fark olup olmadığı ANOVA testi ile belirlenmiş ve gruplar arasındaki farkın istatistiksel olarak önemli olduğu görülmüştür. Yapılan Duncan testi ile birbirlerinden farklılık gösteren gruplar belirlenmiştir. Buna göre, grup 2, grup 4 ve grup 5 arasında fark vardır ancak istatistiksel olarak önemli değildir. Grup 3’de ölçülen değer grup 1 ile grup 2’nin yaklaşık olarak ortalaması kadardır. Grup 3 bu haliyle genel kompozit kuralına uygundur. Doğrusal ısı genleşme katsayısı, bir malzemenin sıcaklığa bağlı olarak genleşme oranını belirlemek için kullanılır. Uygulamada, malzeme veya yapı tasarımında, ısı genleşmeden kaynaklı bir hasarın oluşup oluşmayacağını öncesinde belirlemek için kullanılabilir bir parametredir. Bazı polimerlerin ısı genleşme katsayısı üzerine yapılan önceki çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir. Mussa ve Salih (2021) tarafından yapılan çalışmada, YYPE ve PP polimer ve odun unu ile üretilen kompozit malzemenin ısı genleşme katsayısı dolgu maddesi miktarının artması ile azalmıştır. Huang ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar rapor edilmiştir.

Tablo 4. Isı genleşme bulguları, ANOVA önem düzeyi ve Duncan testi sonuçları

$\times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Gruplar						P değeri
	1	2	3	4	5	6	
$\bar{x}$	15.0 D	11.1 B	13.5 C	11.3 B	10.9 B	8.1 A	P<0.001
ss	0.9	1.3	1.3	1.6	1.9	1.1	

$\bar{x}$: aritmetik ortalama, ss: standart sapma, *Duncan testi sonuçları büyük harfle gösterilmiş ve küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır.

Eğilme direnci testine ait bulgular, ANOVA testi önem düzeyi ve Duncan çoklu ayırım testine ait sonuçlar Tablo 5’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde, en küçük eğilme direnci değerinin grup 1’de ölçüldüğü (14.0 N/mm^2), en büyük değer ise grup 2’de ölçüldüğü (36.4 N/mm^2), diğer grupların bu değerler arasında sıralandığı görülebilir. Ayrıca, grup 1 ile grup 2’nin karışımı olan grup 3’de bu 2 grubun ortalamasına yakın bir değer (25.1 N/mm^2) ölçülmüştür. Gruplar arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak önemlidir ($P<0.001$). Yapılan Duncan testi sonuçlarına göre, sadece grup 3 ile grup 4 benzerdir. Diğer tüm gruplar istatistiksel olarak birbirlerinden farklıdır. Ayrıca, Kompozit malzeme içerisindeki MDF tozu dolgu maddesi miktarı arttıkça eğilme direnci değeri azalmıştır. MDF tozu kullanılan gruplara göre kullanılmayan kontrol grubu grup 3’dür. Bu kontrol grubuna göre, MDF tozu kullanılan deney gruplarının (grup 5 ve grup 6) eğilme direnci önemli derecede azalmıştır. Grup 6’nın eğilme direnci, kontrol grubuna (grup 3) göre yaklaşık olarak %20 oranında azalmıştır. Eğilme direnci değeri, kompozit malzemenin içerisine katılan dolgu maddesi miktarı arttıkça azalmaktadır. Bu konuda yapılan çoğu önceki çalışmada da MDF tozu oranının artması ile kompozit malzemenin eğilme direncinin azaldığı bildirilmiştir (Chavooshi ve Madhoushi 2013; Chavooshi ve ark., 2014). Ancak, bazı çalışmalarda ise, MDF tozu oranının artması ile kompozit malzemenin eğilme direncinin arttığı bildirilmiştir (Özmen ve ark., 2014; Mengeloğlu ve ark., 2015). Bunun yanında, genel olarak, odun-plastik kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan lifsel yapıdaki veya tanecik yapıdaki dolgu maddeleri genel olarak kompozitin eğilme direncini azaltmaktadır (Matuana ve Stark 2015; Altuntaş ve ark., 2017b; Çavuş 2020; Bal 2023a,b).

Eğilmede elastikiyet modülü değerleri, ANOVA testi ve Duncan testi sonuçları Tablo 5’de verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde, en küçük elastikiyet modülü grup 1’de (257 N/mm^2) en yüksek ise grup 2’de (1028 N/mm^2) ölçülmüştür. Diğer grupların elastikiyet modülü değerleri

bu aralıkta sıralanmıştır. Gruplar arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak önemlidir ($P<0.001$). Duncan testi sonuçlarına göre, tüm grupların elastikiyet modülü değerleri birbirlerinden farklıdır. Elastikiyet modülü değeri, kompozit içerisindeki dolgu maddesi yüzdesi arttıkça artmıştır. Bu durum genel kompozit kuralına göre beklenen bir sonuçtur. Kompozit malzemenin özellikleri, kompoziti oluşturan bileşenlere benzerlik gösterir. MDF tozunun genel olarak yoğunluğu ve elastikiyet modülü değeri PE malzemeye göre daha yüksek olduğu için kompozit malzemenin elastikiyet modülü değeri daha yüksektir. Bu konuda yapılan önceki çalışmalarda da kompozit malzemenin elastikiyet modülü değeri ile ilgili benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Chavooshi ve Madhoushi 2013; Chavooshi ve ark., 2014; Özmen 2014; Mengeloğlu ve ark., 2015; Altuntaş ve ark., 2017a,b; Bal 2023a,b).

Eğilme direnci testi sonunda elde edilen, Eğilmede deformasyon değerleri, ANOVA testi ve Duncan testi sonuçları Tablo 5’de verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde, En küçük eğilmede deformasyon değeri grup 6’da ve en büyük değer ise grup 3’de elde edilmiştir. ANOVA testi sonuçlarına göre, gruplar arasında fark vardır. Ancak, Duncan testi sonuçlarına göre, grup 1, grup 2 ve grup 4 arasında önemli bir fark yoktur. Eğilmede deformasyon değeri, eğilme yükü altında malzemenin kırılmadan veya maksimum yükün altında tanımlanan bir yüke kadar kırılmadan dayanabildiği deformasyon değerini göstermektedir. Sunulan bu çalışmada, eğilme direnci testi sonu, kırılma veya maksimum yükün %75 i olarak tanımlanmıştır. Test örnekleri kırılmamış ve yük değeri, maksimum yükün %75’ine kadar azalma gösterdiğinde test tamamlanmıştır. Elde edilene bulgulara göre, genel olarak, kompozit içerisindeki dolgu maddesi arttıkça eğilmede deformasyon değeri azalmıştır. Yapılan önceki çalışmalarda, eğilmede deformasyon değeri, çoğu çalışmada bildirilmemiştir. Ancak, bildirilen çalışmalarda da benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Fiore ve ark., 2014; Bal 2023a; Bal ve ark., 2023)

Tablo 5. Eğilme testi bulguları, ANOVA önem düzeyi ve Duncan testi sonuçları

		Gruplar						P değeri
		1	2	3	4	5	6	
Eğilme Direnci N/mm ²	$\bar{x}$	14.0 A	36.4 E	25.1 D	24.5 D	23.4 C	20.2 B	P<0.001
	ss	1.0	1.5	0.3	0.6	1.0	0.7	
Eğilmede Elastikiyet N/mm ²	$\bar{x}$	257 A	1028 F	578 B	659 C	853 D	985 E	P<0.001
	ss	17.9	63.7	12.7	28.9	44.4	77.8	
Eğilmede Deformasyon mm	$\bar{x}$	19.9 CD	19.4 CD	20.3 D	20.0 CD	18.6 B	15.3 A	P<0.001
	ss	0.7	0.2	0.3	0.3	1.0	2.1	

$\bar{x}$: aritmetik ortalama, ss: standart sapma, *Duncan testi sonuçları büyük harfle gösterilmiş ve küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır.

Çekme testine ait veriler, ANOVA önem düzeyi değerleri ve Duncan testi sonuçları Tablo 6’da sunulmuştur. Sunulan bu veriler incelendiğinde, en küçük çekme direnci değeri grup 6’da (7.1 N/mm²) ve en büyük çekme direnci grup 2’de (22.0 N/mm²) ölçülmüştür. Çekme direnci gruplar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir ($P<0.001$). Duncan testi sonuçlarına göre tüm gruplar birbirinden farklılık göstermiştir. Grup 3, grup 1 ile grup 2’nin ortalamasına yakın bir çekme direnci göstermiştir. Ayrıca, MDF tozu ile doldurulan grupların çekme direnci kompozit üretiminde kullanılan MDF tozu miktarı arttıkça azalmıştır. MDF tozu kullanımı %40 olan grup 6’nın çekme direnci kontrol grubunun (grup 3) çekme direncine kıyasla yaklaşık olarak %53 azalma göstermiştir. Bu konuda yapılan önceki çalışmalarda da benzer şekilde dolgu miktarının artması ile çekme direnci azalmıştır (Rosa ve ark., 2009;

Chavooshi ve Madhoushi 2013; Chavooshi ve ark., 2014; Mengeloğlu ve ark., 2015; Çavuş 2020; Bal 2023a,b; Bal ve ark., 2023) OPK üretiminde kullanılan dolgu maddesinin, çekme direncini bu şekilde azaltmasının nedeni, kompozit içerisindeki dolgu maddesinin polimerik malzemenin özelliğini değiştirmesidir. Matuana ve Stark (2015)'a göre, polimerik matrislere odun unu dolgu maddesi eklenmesi, OPK malzemesini polimerik malzemeye göre daha kırılğan hale getirerek matrisin sünek davranışını azaltmaktadır. Bu nedenle, çekme direnci, dolgu maddesi eklenmeyen polimerik matrise kıyasla azalmaktadır. Ayrıca, Bouafif (2009)'a göre; farklı dolgu maddelerinin lif morfolojilerindeki, kimyasal içeriklerindeki, yoğunluklardaki, selüloz-lignin içeriklerindeki ve en-boy oranlarındaki farklılıklar, lignoselülozik-polimer kompozitlerdeki farklı güçlendirme etkisinin nedenidir.

Tablo 6. Çekme testi bulguları, ANOVA önem düzeyi ve Duncan testi sonuçları

		Gruplar						P değeri
		1	2	3	4	5	6	
Çekme Direnci N/mm ²	$\bar{x}$	10.6 C	22.0 F	15.1 E	12.8 D	9.1 B	7.1 A	P<0.001
	ss	1.2	1.1	0.3	0.4	0.9	0.5	
Çekmede elastikiyet N/mm ²	$\bar{x}$	224 A	400 C	264 AB	278 B	448 D	484 D	P<0.001
	ss	49	31	17	25	78	42	
Kopmada uzama %	$\bar{x}$	190.1 B	19.1 A	21.5 A	13.0 A	4.6 A	3.1 A	P<0.001
	ss	169.3	1.9	1.3	1.8	0.8	0.5	

$\bar{x}$: aritmetik ortalama, ss: standart sapma, *Duncan testi sonuçları büyük harfle gösterilmiş ve küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır.

Çekmede elastikiyet modülüne ait veriler, ANOVA önem düzeyi değerleri ve Duncan testi sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur. Bu veriler incelendiğinde, genel olarak çekme direnci verilerinin aksine bazı veriler elde edildiği görülebilir. En büyük çekmede elastikiyet değeri grup 6'da (484 N/mm²) ve en küçük grup 1'de (224 N/mm²) elde edilmiştir. Deney gruplarının elastikiyet değerleri, kontrol grubuna göre, dolgu maddesi içeriği arttıkça artış göstermiştir. Gruplar arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak önemlidir. Ancak, grup 5 ile grup 6 arasındaki fark önemli değildir. Bu konuda yapılan önceki çalışmalarda da, çekmede elastikiyet sonuçları hakkında benzer sonuçlar bildirilmiştir (Rosa ve ark., 2009; Özmen ve ark., 2014; Mengeloğlu ve ark., 2015; Çavuş 2020; Bal 2023a,b; Birinci ve Kaymakçı 2023; Bal ve ark., 2023). Çekme direnci ve eğilme direncinin dolgu maddesi miktarının artması ile azalması ve eğilmede ve çekmede elastikiyetin dolgu maddesi miktarının artması ile artması aslında bir çelişki olarak düşünülebilir. Çünkü hem direnç ve hem de elastikiyet mekanik bir özelliktir. Ancak, direnç ile elastikiyetin genel tanımı bu çelişkiyi açıklamaktadır. Direnç, kompozit malzemenin kuvvet uygulandığında bir arada kalma yeteneğidir. Elastikiyet ise, bir malzemenin uygulanan kuvvete, karşı koyma yeteneğidir. Bu nedenle, her ikisi de mekanik bir özellik olsa bile, gösterdikleri yetenek farklıdır.

Çekme testi esnasında elde edilen kopmada uzama verileri, ANOVA önem düzeyi değerleri ve Duncan testi sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur. Bu verilere göre; en yüksek kopmada uzama yüzdesi grup 1'de ve en küçük grup 6'da ölçülmüştür ve sadece grup 1 ile diğer gruplar arasındaki fark önemlidir. Diğer gruplar arasında fark vardır ancak farklar istatistiksel olarak önemsizdir. MDF tozu eklenen grupların kopmada uzama değerleri dolgu maddesi yüzdesi arttıkça azalmıştır. Yapılan önceki çalışmalarda benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Rosa ve ark., 2009; Mengeloğlu ve ark., 2015; Taşdemir 2020; Çavuş 2020; Bal 2023a,b; Bal ve ark., 2023).

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, G-DYPE ve Y-YYPE karışımının bazı özellikleri üzerine dolgu maddesi olarak kullanılan MDF tozunun etkisi araştırılmıştır. Bunun için, G-DYPE, Y-YYPE ve farklı oranlarda MDF tozu extruder de karıştırılmış ve düz presleme yöntemi ile PE esaslı odun plastik kompozit levhalar üretilmiştir. Elde edilen kompozit malzemenin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre aşağıdaki sonuçlar söylenebilir;

- Çalışma kapsamında üretilen kompozitlerin; yoğunluk değerleri, eğilme direnci, çekme direnci, kalıplama daralması ve doğrusal ısıl genleşme katsayısı dolgu maddesi miktarı arttıkça azalmıştır. Eğilme direnci ve çekme direncinin azalması olumsuz bir sonuç ve kalıplama daralması ve doğrusal ısıl genleşme katsayısının azalması ise olumlu bir sonuç olduğu söylenebilir.
- Kompozitlerin eğilmede ve çekmede elastikiyet modülü değerleri, kullanılan dolgu maddesi miktarının artmasına paralel olarak, artış göstermiştir. Bu durumun olumlu bir sonuç olduğu söylenebilir.
- Çalışma kapsamında %40 seviyesine kadar, MDF tozu kullanılmış ve kompozitler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Bu durumun, endüstriyel bir atık olan MDF tozunun OPK üretiminde kullanılabilmesi bakımından, olumlu bir sonuç olduğu söylenebilir. MDF tozunun odun-plastik kompozit malzemelerde kullanımı, hem çevresel hem de ekonomi açısından avantaj sağlayacaktır.

Yazar Katkısı

Bekir Cihad Bal: Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), Metodolojinin belirlenmesi, Araştırmanın yapılması, Analizlerin yapılması, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma, inceleme ve düzenleme.

Finansal destek beyanı

Finansal destek alınmamıştır.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması beyan etmemiştir.

Kaynaklar

- Akdoğan, E., (2020). The effects of high density polyethylene addition to low density polyethylene polymer on mechanical, impact and physical properties, *European Journal of Technique (EJT)*, 10(1), 25-37, DOI: [10.36222/ejt.646693](https://doi.org/10.36222/ejt.646693)
- Altuntaş, E., Salan, T., ve Alma, M. H., (2016). Farklı bor bileşik kullanılarak MDF-AYPE odun plastik kompozitlerin yangına dayanıklılığının araştırılması, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 19-23.
- Altuntas, E., Narlioglu, N., and Alma, M., (2017a). Investigation of the fire, thermal, and mechanical properties of zinc borate and synergic fire retardants on composites produced with PP-MDF wastes, *BioResources*, 12(4), 6971-6983. DOI: [10.15376/biores.12.4.6971-6983](https://doi.org/10.15376/biores.12.4.6971-6983)
- Altuntaş, E., Yılmaz, E., ve Salan, T., (2017b), Yüksek oranda lif dolgu maddesi kullanımının odun plastik kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisinin araştırılması, *Turkish Journal of Forestry*, 18(3), 258-263, DOI: [10.18182/tjf.308969](https://doi.org/10.18182/tjf.308969)

- ASTM D 638., (2004). Standard test method for tensile properties of plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA. 1–24s.
- ASTM D 790., (2004). Flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, PA. 1–9s.
- ASTM D 792 (2004) Standard test method for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement, Annual Book of American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards, Philadelphia, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States
- ASTM D4703-16 (2016) Compression molding thermoplastic materials into test specimens, plaques, or sheets, Annual Book of American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards, Philadelphia, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.
- Ayrilmis, N., Kuzmin, A. M., Masri, T., Yagoub, M., Sedira, L., Pantyukhov, P., and Al-Farraj, S. A. (2025). Effects of reinforcement by both waste glass and barley straw on water resistance, mechanical, and thermal properties of polyethylene composite, *BioResources*, 20(3), 5967–5987, DOI: [10.15376/biores.20.3.5967-5987](https://doi.org/10.15376/biores.20.3.5967-5987)
- Avella M., Avolio, R., Bonadies, I., Carfagna C., Errico M.E., and Gentile G., (2009) Recycled multilayer cartons as cellulose source in HDPE-based composites: Compatibilization and structure-properties relationships. *Journal of Applied Polymer Science*, 114(5): 2978-2985, DOI: [10.1002/app.30913](https://doi.org/10.1002/app.30913)
- Bal, B. C. (2023a). Some mechanical properties of WPCs with wood flour and walnut shell flour, *Polímeros*, 33(2), e20230020, 1-8, DOI: [10.1590/0104-1428.20230005](https://doi.org/10.1590/0104-1428.20230005)
- Bal, B. C. (2023b). Comparative study of some properties of wood plastic composite materials produced with polyethylene, wood flour, and glass flour. *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 6(1), 70-79. DOI: [10.33725/mamad.1301384](https://doi.org/10.33725/mamad.1301384)
- Bal, B. C., Altuntaş, E., and Narlıoğlu, N. (2023). Some selected properties of composite material produced from plastic furniture waste and wood flour, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 6(2), 233-244. DOI: [10.33725/mamad.1384214](https://doi.org/10.33725/mamad.1384214)
- Bal, B. C., and Narlıoğlu, N., (2024). Physical and mechanical properties of composites produced from recycled polypropylene and cardboard-polyethylene-aluminium mixture. *Tribology and Materials*, 3(4), 163-171, DOI: [10.46793/tribomat.2024.018](https://doi.org/10.46793/tribomat.2024.018)
- Bhaskar, K. B., Devaraju, A., and Paramasivam, A., (2021). Experimental investigation of glass powder reinforced polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 39, 484-487, DOI: [10.1016/j.matpr.2020.08.211](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.211)
- Birinci, E., and Kaymakci, A., (2023). Effect of processing technology, nanomaterial and coupling agent ratio on some physical, mechanical, and thermal properties of wood polymer nanocomposites, *Forests*, 14(5), 1036, DOI: [10.3390/f14051036](https://doi.org/10.3390/f14051036)
- Bouafif, H., Koubaa, A., Perré, P., and Cloutier, A., (2009). Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(12), 1975-1981, DOI: [10.1016/j.compositesa.2009.06.003](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.06.003)
- Chavooshi, A., and Madhoushi, M., (2013). Mechanical and physical properties of aluminum powder/MDF dust/polypropylene composites, *Construction and Building Materials*, 44, 214-220, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2013.02.079](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.079)

- Chavooshi, A., Madhoushi, M., Shakeri, A., and Khazaeian, A., (2014). A comparative study on the effects of material blending method on the physico-mechanical properties of WPCs made from MDF dust, *Journal of Applied Polymer Science*, 131(15), DOI: [10.1002/app.40513](https://doi.org/10.1002/app.40513)
- Çavus, V., (2020), Selected properties of mahogany wood flour filled polypropylene composites: The effect of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP), *BioResources* 15(2), 2227-2236, DOI: [10.15376/biores.15.2.2227-2236](https://doi.org/10.15376/biores.15.2.2227-2236)
- Ebadi M, Farsi M, Narchin P, and Madhoushi, M., (2016). The effect of beverage storage packets (Tetra Pak™) waste on mechanical properties of wood–plastic composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 29(12): 1601-1610. DOI: [10.1177/0892705715618745](https://doi.org/10.1177/0892705715618745)
- Ebadi M, Farsi M, and Narchin P., (2017). Some of the physical and mechanical properties of composites made from Tetra Pak™/LDPE, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 31(8), 1054-1065. DOI: [10.1177/0892705717734597](https://doi.org/10.1177/0892705717734597)
- Fiore, V., Botta, L., Scaffaro, R., Valenza, A., and Pirrotta, A. (2014), PLA based biocomposites reinforced with Arundo donax fillers, *Composites Science and Technology*, 105, 110-117, DOI: [10.1016/j.compscitech.2014.10.005](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.005)
- Güler, C., ve Doğan, V., (2022). MDF üretiminde zımpara tozu kullanım olanaklarının araştırılması, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 1-7, DOI: [10.33725/mamad.1114080](https://doi.org/10.33725/mamad.1114080)
- Hamouda T, Hassanin AH, Saba N, Demirelli M, Kilic A, Candan Z, and Jawaid, M., (2019). Evaluation of mechanical and physical properties of hybrid composites from food packaging and textiles wastes, *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 489-497. DOI: [10.1007/s10924-019-01369-3](https://doi.org/10.1007/s10924-019-01369-3)
- Huang, R., Xiong, W., Xu, X., and Wu, Q., (2012). Thermal expansion behavior of co-extruded wood-plastic composites with glass-fiber reinforced shells, *BioResources*, 7(4), 5514-5526.
- Kuzmin, A., Ashori, A., Pantyukhov, P., Zhou, Y., Guan, L., and Hu, C. (2024). Mechanical, thermal, and water absorption properties of HDPE/barley straw composites incorporating waste rubber, *Scientific Reports*, 14(1), 25232. DOI: [10.1038/s41598-024-76337-6](https://doi.org/10.1038/s41598-024-76337-6)
- Matuana, L. M., Stark, N. M., (2015). *The use of wood fibers as reinforcements in composites*, in: Biofiber Reinforcements in Composite Materials, Woodhead Publishing, Swaston, UK, pp. 648-688, DOI: [10.1533/9781782421276.5.648](https://doi.org/10.1533/9781782421276.5.648)
- Mengelöglü, F., Basboga, İ. H., and Aslan, T. (2015). Selected properties of furniture plant waste filled thermoplastic composites, *Pro Ligno*, 11(4), 199-206.
- Mohareb AS, Hassanin AH, Candelier K, Thévenon MF, and Candan Z., (2017) Developing biocomposites panels from food packaging and textiles wastes: physical and biological performance. *Journal of Polymers and the Environment*, 25, 126-135, DOI: [10.1007/s10924-016-0791-6](https://doi.org/10.1007/s10924-016-0791-6)
- Mussa, H. M., and Salih, T. W. M., (2021). Experimental investigation on thermal properties of wood-plastic composites as flat panels, *Journal of Engineering Research*, 9 (ICRIE-Special Issue), 1-16

- Özmen, N., Çetin, N. S., Narlıoğlu, N., Çavuş, V., ve Altuntaş, E., (2014). MDF atıklarının odun plastik kompozitlerin üretiminde değerlendirilmesi. *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, 15, 65-71. DOI: [10.18182/tjf.64025](https://doi.org/10.18182/tjf.64025)
- Rosa, S. M. L., Santos, E. F., Ferreira, C. A., and Nachtigall, S. M. B., (2009). Studies on the properties of rice-husk-filled-PP composites: effect of maleated PP, *Materials Research*, 12, 333-338. DOI: [10.1590/S1516-14392009000300014](https://doi.org/10.1590/S1516-14392009000300014)
- Revilla-Díaz, R., Sánchez-Valdés, S., López-Campos, F., Medellín-Rodríguez, F. J., and López-Quintanilla, M. L., (2007). Comparative characterization of PP nano-and microcomposites by in-mold shrinkage measurements and structural characteristics, *Macromolecular Materials and Engineering*, 292(6), 762-768
- Sadik, W. A., El-Demerdash, A. G. M., Abokhateeb, A. E., and Elessawy, N. A., (2021). Innovative high-density polyethylene/waste glass powder composite with remarkable mechanical, thermal and recyclable properties for technical applications, *Heliyon*, 7(4). e06627, DOI: [10.1016/j.heliyon.2021.e06627](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06627)
- Stark, N., and Berger, M. J., (1997). Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites, *Proceeding of functional fillers for thermoplastic and thermosets*. December, 8-10.
- Taşdemir, M., (2020). Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)/atık üre formaldehit polimer karışımlarının mekanik özellikleri, *International Periodical of Recent Technologies in Applied Engineering*, 2(2), 51-55.
- Tufan, M., Güleç, T., Çukur, U., Akbaş, S., ve İmamoğlu, S., (2015). Atık bardaklardan üretilen odun plastik kompozitlerin bazı özellikleri, *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 15(2), 176-182. DOI: [10.17475/kuofd.76245](https://doi.org/10.17475/kuofd.76245)
- Yazıcıoğlu O., Borat, O., (2018). *İmalat Yöntemleri*, Seçkin Yayınevi, Ankara.



3B yazıcı ile üretilen mobilya kulplarının performansının incelenmesi

Sedanur Şeker^{1*} 

ÖZ: Çalışmada, 3 boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak PetG filament ile üretilen mobilya kulplarının mekanik dayanımları araştırılmıştır. Gri ve beyaz renk seçeneklerinde olmak üzere, %50 ve %80 iç doluluk oranlarına sahip kulp örnekleri üretilmiştir. Numuneler, TS 13866 “Mobilya Kulpları ve Ayakları” standardına uygun olarak test edilmiş ve bağlantı yönüne hem paralel hem de dik yönde en az 100 N sabit kuvvet uygulanarak değerlendirilmiştir. Her test, 60 saniyelik süreyle beş kez tekrarlanmış ve sonuçlar dayanım açısından analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, doluluk oranının mekanik dayanım üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. %80 doluluk oranına sahip örnekler, hem paralel hem de dik yönlü yüklemelerde yüksek dayanım sergilerken, %50 doluluk oranlı kulplarda özellikle dik yönde vida bağlantı noktalarında erken deformasyonlar gözlemlenmiştir. Renk farkı açısından ise beyaz PetG örnekleri, gri renklilere göre daha geç deformasyona uğramıştır. Ayrıca, testler boyunca metal kulplar en yüksek performansı göstermiştir. Bu çalışma, 3B yazıcı ile üretilen plastik kulpların, uygun malzeme ve üretim parametreleriyle geleneksel metal kulplara alternatif olabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Mobilya kulpu, Katmanlı üretim, Pet-G, 3B yazıcı

Investigation of the performance of furniture handles produced by 3D printing

ABSTRACT: In this study, the structural strength of furniture handles produced using 3D printing technology with PetG filament was investigated. Handle samples were manufactured in gray and white colors with infill ratios of 50% and 80%. The specimens were tested according to the TS 13866 “Furniture Handles and Legs” standard, and a constant force of at least 100 N was applied both parallel and perpendicular to the attachment direction. Each test was repeated five times for 60 seconds, and the results were analyzed in terms of durability. The data showed that the infill ratio plays a significant role in the structural strength. Samples with 80% infill demonstrated high strength under both parallel and perpendicular loads, while 50% infill handles exhibited early deformations at the screw connection points, especially under perpendicular loading. Regarding color, white PetG samples deformed later compared to gray ones. Additionally, metal handles showed the highest performance throughout the tests. This study indicates that plastic handles produced by 3D printing can be a viable alternative to traditional metal handles when appropriate materials and production parameters are used.

Keywords: Furniture handle, Additive manufacturing, PetG, 3D printing

1 Giriş

Mobilya aksesuarları, bir mobilya ürününün tamamlayıcı ve işlevsel unsurlarıdır. Sürgülü ray sistemlerinden menteşelere, kulplardan aydınlatma sistemlerine kadar geniş bir yelpazeyi kapsar. 2024 ve 2025 yılları itibarıyla mobilya aksesuarları, sadece işlevsel değil, aynı zamanda estetik ve sürdürülebilirlik açısından da değerlendirilmektedir (Ekmekçioğlu, 2024).

Mobilya aksesuarları, mobilyanın genel görünümünü zenginleştiren dekoratif elemanlar olarak tasarım sürecinde kritik bir rol oynar. Çalışmalar, aksesuarların mobilyaya özgünlük ve karakter kazandırdığını ve tüketici tercihlerinde önemli etkisi olduğunu göstermektedir (Kaya ve Özkan, 2022). Aksesuarlar, mobilyanın kullanımını kolaylaştıran işlevsel bileşenlerdir. Örneğin, menteşeler, çekme kolları, raylar ve bağlantı elemanları mobilyaların açılıp kapanmasını, taşınmasını veya parçalarının sabitlenmesini sağlar (Kalaycıoğlu ve ark., 2017). Doğru seçilmiş ve kaliteli aksesuarlar, mobilyanın dayanıklılığını artırarak ürün ömrünü uzatır. Aynı zamanda, sürdürülebilir üretim süreçlerinde çevre dostu malzemelerden yapılmış aksesuarların kullanımı önem kazanmaktadır (Demirtaş ve Kılıç, 2023). Öztürk ve Yıldırım 2022 mobilya aksesuarlarının ergonomik tasarımının kullanıcı memnuniyeti üzerindeki etkisini incelemiştir. Ahşap aksesuarların tutma, kavrama ve kullanım kolaylığı açısından optimize edilmesi için öneriler sunulmuş ve saha deneyleri ile desteklenmiştir.

3B baskı teknolojisinin gelişimi son yıllarda özellikle popüler hale gelmiş ve bilim, üretim, tasarım, tıp, havacılık, spor vb. çeşitli alanlara yaygın bir şekilde girmiştir. Mobilya sektörü de bu trende ayak uydurmakta ve birçok tasarımcı farklı şekil ve işlevlerle deneyler yapmaktadır (Jarza ve ark., 2023; Nasir ve ark., 2022). Son zamanlarda, 3B baskı teknolojisi ile elde edilen yeni bağlantı elemanları da ortaya çıkmış ve mobilya endüstrisinin ilgisini çekmiştir (Branowski ve ark., 2022, Smardzewski ve ark., 2016, Uysal, 2024). PLA, ABS gibi termoplastikler FDM teknolojisinde yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler, mobilya aksesuarlarının üretiminde mekanik dayanıklılık, esneklik ve estetik açıdan önemli rol oynar. PLA, biyobozunur yapısı ve baskı kolaylığı nedeniyle prototip ve dekoratif aksesuar üretiminde tercih edilirken, ABS daha yüksek darbe dayanımı ve ısı direnci sayesinde fonksiyonel parçalar için uygundur.

Literatürde, mobilya aksesuarlarının performansını artırmak amacıyla FDM’de kullanılan termoplastiklerin mekanik özelliklerinin optimize edilmesine yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar, filament karışımları, dolgu malzemeleri ve baskı parametrelerinin düzenlenmesi gibi yöntemlerle aksesuarların dayanıklılığını artırmayı hedeflemektedir (Nicolau ve ark., 2022). Böylece, hem estetik hem de fonksiyonel açıdan yüksek kalitede mobilya aksesuarlarının FDM ile üretilmesi mümkün olmaktadır. Akkaş ve Güzel (2021), mobilya tamirinde geleneksel yöntemlerin yanı sıra ileri teknolojilerin kullanıldığı yenilikçi bir yaklaşımı incelemişlerdir. Çalışmalarında, özellikle 3B tarama ve 3B baskı teknolojilerinin mobilya üretimindeki tamir ve yenileme süreçlerine entegrasyonunu detaylandırmışlardır.

Nicolau ve ark. (2022), 3B baskı teknolojisinin mobilya tasarımında sağladığı esneklik ve fonksiyonelliği ön plana çıkaran yenilikçi bir modüler sistem yaklaşımı geliştirmiştir. Bu çalışma, özellikle hassas 3B baskılı bağlantı elemanlarının kullanımıyla mobilya parçalarının hızlı, sağlam ve özelleştirilebilir şekilde birleştirilmesine odaklanmaktadır. Ayrıca 3B baskı teknolojisi; klasikleşmiş, sınırlı tipteki donanım parçalarının yerine, küçük ölçekli özelleştirme ve daha çeşitli formların üretilmesini sağlamaktadır. Bu durum, mobilya aksesuarlarında esneklik ve çeşitliliği önemli ölçüde artırmaktadır (Petrova and Jivkov, 2024).

Svoboda ve ark. (2023) tarafından gerçekleştirilen araştırma, 3B baskı teknolojisinin panel mobilya üretim ve montaj süreçlerine getirdiği yenilikleri ve sürdürülebilirlik katkılarını

kapsamlı şekilde incelemiştir. Çalışmada, özellikle plastik bazlı 3B baskılı bağlantı parçalarının, klasik metal veya ahşap bağlantı elemanlarının yerine kullanılmasının montaj sürecinde esneklik sağladığı vurgulanmaktadır. Hsieh ve Ku'nun (2019) çalışmasında, mobilya donanım parçalarının (örneğin kulplar, menteşeler) geleneksel üretim sınırlamaları yerine, 3B baskı sayesinde kullanıcıya özel tasarımların ve yeni formların mümkün olduğu vurgulanmaktadır. Bu durum, özellikle küçük ölçekli üretimlerde maliyet-etkin çözümler sunar. 3B yazıcıyla üretilen bağlantı aksesuarlarının (ör. köşe elemanları) geleneksel yöntemlere kıyasla daha iyi eğilme ve rijitlik özelliklerine sahip olduğu deneysel olarak ortaya konmuştur. Özellikle PLA bazlı malzemelerle yapılan üretimlerde dayanıklılık yüksek çıkmıştır. Aiman ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, FDM tipi 3B yazıcılar ile üretilen modüler bağlantı elemanlarının yüksek taşıma kapasitesi (730 kg'a kadar) ve hafifliğiyle (yaklaşık 113 g) öne çıktığını göstermektedir (Aiman ve ark., 2020). Chen ve ekibi, 3B baskı ile üretilen mobilya aksesuarlarında en iyi üretim hassasiyetini elde etmek için nozzle sıcaklığı, doluluk oranı gibi parametreleri Taguchi yöntemiyle optimize etmiştir. Bu, daha dayanıklı ve doğru oturan aksesuarların üretimine olanak tanımaktadır (Chen ve ark., 2023).

Bu çalışmanın amacı; 3 B yazıcı kullanılarak farklı renklerde Pet-G tip filament ile üretilen mobilya kulplarının, iki farklı doluluk oranında (%50-80) üretilip mekanik dayanımlarının standarda tam uygun test yöntemi uygulanması ile incelenmesidir. Yapılan testler sonucunda, 3B yazıcıyla üretilen kulpların performansı endüstride yaygın olarak kullanılan metal kulplarla karşılaştırılmıştır. Bu sayede, geleneksel metal kulplar yerine 3 B yazıcıdan üretilen plastik kulpların kullanımının mümkün olup olmadığı değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve Metot

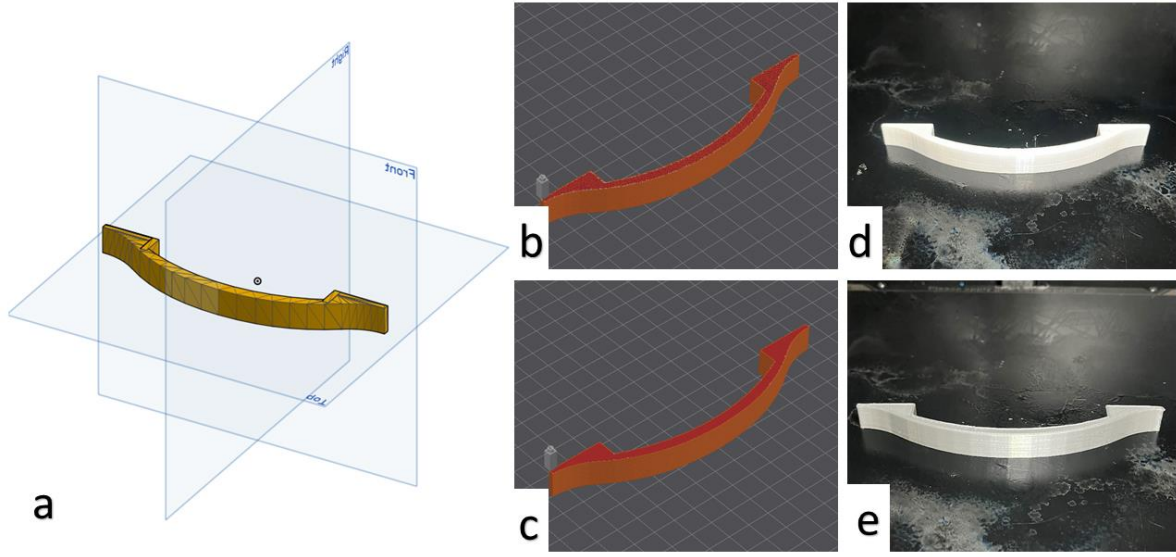
2.1 Materyal

Bu araştırmada, mobilya kulp örnekleri, PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) malzemesi kullanılarak 3B yazıcıyla üretilmiştir.

PETG malzemesinin tercih edilme nedeni; kolay baskı sürecine sahip olması, PLA ve ABS filamentlerin avantajlarını bir arada sunması, sıcaklık ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı olması, yüksek mekanik mukavemet değerleri sunması, düşük maliyetli olması ve çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilirliğidir. Bu özellikleri nedeniyle çalışma kapsamında kullanılmaya uygun bulunmuştur.

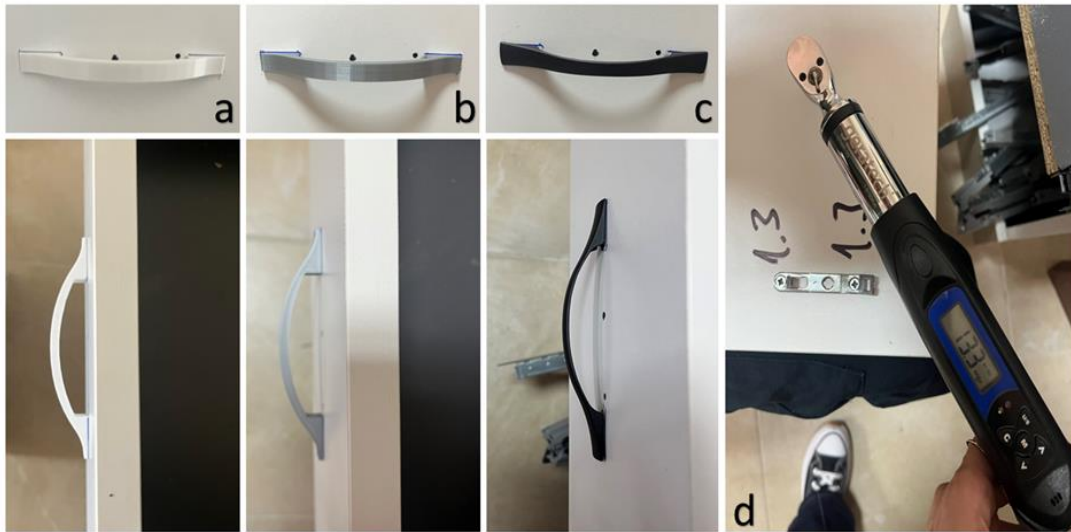
Kullanılan PETG filament, ticari bir filament üreticisinden hazır olarak temin edilmiştir. Numuneler gri ve beyaz olmak üzere iki farklı renkte ve iki farklı iç dolu oranıyla üretilmiştir. Örnek kulp tasarımları Onshape yazılımı kullanılarak oluşturulmuş (Şekil 1.a), ardından STL formatında kaydedilmiştir.

Tasarımlar, Creality Print 6.0 dilimleme programında G kodlarına çevrilmiş (Şekil 1.b,c) ve üretim aşaması Creality K1 MAX model 3B yazıcı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.c). 3B yazıcı özelliklerinden doluluk oranı değiştirilerek çalışma yapılmıştır (Şekil 1. d,e). Bu özellikler haricinde makine özellikleri (Katman yüksekliği;0.3 mm, Nozül boyutu; 0.4 mm, Yazıcı hızı; 50 mm/sn, Dış katman hızı; 25 mm/sn, iç katman hızı; 35 mm/sn, İç dolgu hızı; 50mm/sn, Nozül sıcaklığı; 260°C, Yatak sıcaklığı; 65°C, Alt-üst katman; 3 katman) sabit bırakılmıştır.



Şekil 1. a. Numunelerin hazırlanması, G kodu tanımlaması; **b.** %50, **c.** %80, test numunelerinin hazırlanması; **d.** Beyaz PETG, **e.** Gri PETG.

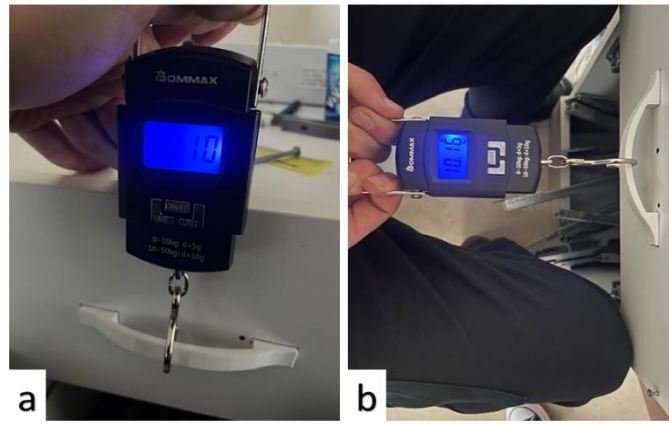
Filament malzemeden üretilen kulplar ile endüstride yaygın olarak kullanılan metal kulplar (tercih edilen metal alaşım malzemeden üretilen), montaja hazır hale getirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılacak çekmece ön kapakları, homojen yüzey yapısı ve kolay işlenebilirliği nedeniyle MDF (Medium Density Fiberboard-Orta Yoğunlukta Lif Levha) malzemeden seçilmiştir. Kulplar, kapakların tam orta noktasına hizalanacak şekilde, aynı vida tipi (18 x 3.5 mm yonga levha vidası) kullanılarak monte edilmiştir (Şekil 2.a,b,c). Deney sonuçlarının güvenilirliğini artırmak ve montaj kaynaklı değişkenlikleri ortadan kaldırmak amacıyla, tüm vidalama işlemleri sabit bir tork değeri olan 1.33 Nm ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, bir torkmetre yardımıyla kontrol edilerek uygulanmış, böylece tüm numunelerde eşit sıkılıkta montaj sağlanarak standardizasyon oluşturulmuştur (Şekil 2. d).



Şekil 2. Montajlanmış numune örnekleri; **a.** Beyaz PETG, **b.** Gri PETG, **c.** Metal Kulp, **d.** Vidaların torkmetre ile sabitlenmesi.

2.2 Metot

Montajı yapılan numuneler üzerinde gerçekleştirilen testler, TS 13866 “Mobilya Kulpları ve Ayakları” standardı esas alınarak uygulanmıştır. Bu kapsamda, her kulp numunesi (üçer tekrarlı olmak üzere), imalatçının belirttiği montaj ve kullanım koşullarına uygun şekilde bağlantısı yapılmış halde test edilmiştir. Deney sırasında, kulp bağlantı yönüne paralel ve dik olacak şekilde, her iki yönde de ayrı ayrı olmak üzere en az 100 N’luk sabit bir kuvvet, her bir yönde 60 saniye süreyle (kronometre ile süreler tutulmuştur) ve 5 kez arka arkaya uygulanmıştır (uygulamada Ommax markalı kuvvetölçer tercih edilmiştir). Bu uygulama, kulpun yapısal bütünlüğünü ve bağlantı noktalarının dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Mobilya kulpunun mekanik dayanım testine ilişkin deney düzeneği ve kuvvetin uygulanma yönleri Şekil 3’te (Şekil 3.a dikine, 3.b. paralel) şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. Standarda uygun testlerin yapılması; **a.** Dik yönde 100N uygulaması, **b.** Paralel yönde 100N uygulaması.

Çalışmada değerlendirme yöntemi olarak, TS 13866 standardına uygun testlerin ardından, her numunenin "standartı geçip geçmediği" esasına dayalı bir sınıflandırma yapılmıştır. Bu yöntemle, her kulpun uygulanan test koşullarını başarıyla karşılayıp karşılamadığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, kırılma ya da deformasyon yaşanan numunelerde, hasarın meydana geldiği bölgeler detaylı şekilde incelenmiş; kırılmanın hangi kuvvet uygulaması sırasında ve hangi yapısal noktada gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda, 3B yazıcıdan üretilen kulplar ile endüstride kullanılan metal kulplar arasında yapısal dayanım açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmaya ait deney deseni Çizelge 1 de verilmiştir.

Çizelge 1. Fiziksel özellikler

Kulp Malzemesi	Renk	Dolgu Deseni	Yükleme	Tekrar Sayısı
Pet-G	Gri	%50	Paralel/100N Dik/100N	5
		%80		
	Beyaz	%50		
		%80		
Metal	-	-		

Bu değerlendirmeler sonucunda, yazıcıdan üretilen kulpların hangi koşullarda kullanılabilir olduğu, hangi tasarım ve üretim parametrelerinin performansı etkilediği gibi çıkarımlarda bulunulmuştur.

3 Bulgular ve Tartışma

Çalışmada, TS 13866 standardına uygun olarak gerçekleştirilen mekanik testler sonucunda elde edilen veriler sunulmakta ve değerlendirmeler yapılmaktadır. Farklı doluluk oranları ve renklerde PETG filament kullanılarak üretilen 3B kulp numuneleri ile endüstriyel metal kulplar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. 3B kulp numuneleri ile endüstriyel metal kulplar karşılaştırma sonuçları

Kulp Malzemesi	Renk	Dolgu Oranı	Sonuç 1		Sonuç 2		Sonuç 3		Sonuç 4		Sonuç 5	
			Paralel	Dik	Paralel	Dik	Paralel	Dik	Paralel	Dik	Paralel	Dik
Pet-G	Gri	%50	+	x	+	x	+	x	+	x	x	+
		%80	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Beyaz	%50	+	+	+	+	+	x	+	x	x	+
		%80	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Metal	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

X: kaldı, +: geçti

Ayrıca, örneklem büyüklüğünün sınırlı olması nedeniyle, gruplar arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Fisher's Exact Test kullanılarak değerlendirilmiştir. İstatistiksel analizler SPSS 2024 programı ile gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar Çizelge 3'te sunulmuştur. Analizde grup değişkeni malzeme-renk-dolgu-yön kombinasyonu, sonuç değişkeni ise (+ / x) kaldı/ geçti olarak tanımlanmıştır.

Yapılan testler sonucunda, farklı kulp malzemeleri, renkleri ve dolgu oranlarının mekanik dayanım üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Testler, hem paralel hem de dik yönlü yüklemeler altında, beş farklı senaryo üzerinden gerçekleştirilmiş olup, her bir test 5 kez tekrar edilmiştir. Bu tekrarlar sayesinde malzemelerin tutarlılığı ve tekrarlanabilir dayanım değerleri gözlemlenebilmiştir. Testler sırasında, özellikle düşük dolgu oranına sahip örneklerde, bazı testlerin 3. veya 4. tekrarında vida bağlantı noktalarında ayrılmalar meydana gelmiştir. Bu durum, malzemenin uzun süreli ya da tekrarlı yüklemeler altındaki davranışını değerlendirme açısından önemli bir gözlemdir. Vida yerlerinde oluşan bu ayrılmalar, özellikle katmanlar arası dayanımın düşük olduğu durumlarda (örneğin %50 dolgu oranı ve dik yöndeki zorlamalar) daha sık gözlemlenmiştir.

Çizelge 3. Test sonuçlarının istatistiksel incelenmesi

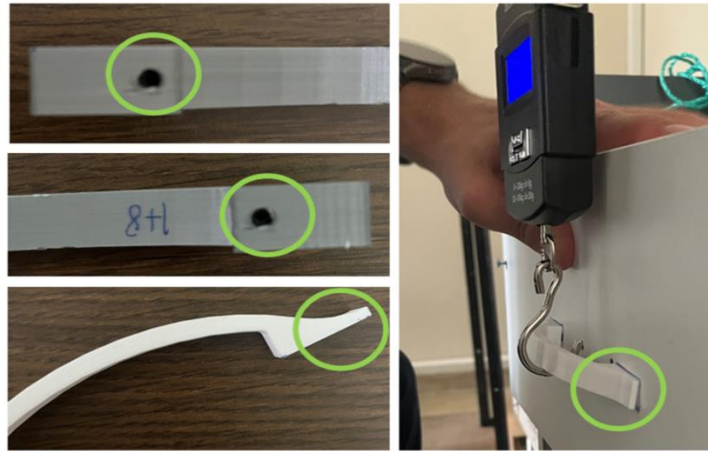
Kulp Malzemesi	Renk	Dolgu Oranı	Test Yönü	Başarı Oranı (0-1)
Metal	-	0	Dik	1.00
Metal	-	0	Paralel	1.00
PetG	Beyaz	50	Dik	0.60
PetG	Beyaz	50	Paralel	0.80
PetG	Beyaz	80	Dik	1.00
PetG	Beyaz	80	Paralel	1.00
PetG	Gri	50	Dik	0.20
PetG	Gri	50	Paralel	0.80
PetG	Gri	80	Dik	1.00
PetG	Gri	80	Paralel	1.00

Testlerde kullanılan Pet-G malzemesi, dolgu oranı arttıkça performans açısından belirgin bir iyileşme göstermiştir. Özellikle %80 dolgu oranına sahip Pet-G örnekleri, hem paralel hem de dik yönlerde uygulanan tüm testlerde başarılı sonuçlar vermiştir. Bu da, yüksek dolgu oranının parça mukavemetini artırarak, test boyunca vida bölgelerinde oluşabilecek deformasyonları engellediğini göstermektedir. Buna karşılık, %50 dolgu oranına sahip gri renkli Pet-G örnekleri, tüm dik yönlü testlerde başarısız olmuş ve bu örneklerde vida bağlantı bölgelerinde erken ayrılmalar tespit edilmiştir. Bu durum, düşük dolgu oranının katmanlar arası yapışmayı zayıflattığını ve tekrarlı yüklemelerde yapısal bütünlüğün korunamadığını ortaya koymaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Test sonunda PETG gri renk malzeme ile üretilen numunelerin deformasyonuna dair görüntüler

Beyaz renkli Pet-G malzeme, aynı dolgu oranında (%50) gri renge göre daha iyi bir performans sergilemiştir. Bazı dik yön testlerinde ayrılma görölse de, bu genellikle 4. veya 5. tekrar sırasında meydana gelmiş, gri örneklerdeki kadar erken deformasyon gözlemlenmemiştir. Bu farkın, malzemenin renk pigmentine bağlı olarak farklı üretim özelliklerinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Tüm bu sonuçların yanı sıra, metal kulplar testlerde en yüksek başarı oranını göstermiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Test sonunda PETG beyaz renk malzeme ile üretilen numunelerin deformasyonuna dair görüntüler

Metal malzeme, hem paralel hem de dik yönlü uygulamalarda hiçbir testte başarısızlık göstermemiş, tüm tekrarlar boyunca yapısal bütünlüğünü korumuştur. Vida bağlantı noktalarında herhangi bir gevşeme veya ayrılma tespit edilmemiştir. Bu da metal kulpların, mekanik dayanım açısından diğer malzemelere göre çok daha üstün olduğunu göstermektedir. Her bir numunenin standardı geçip geçmediği belirlenmiş, kırılma veya deformasyon gözlemlenen örneklerde hasarın olduğu bölgeler ve kırılmanın meydana geldiği tekrar tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, 3B yazıcıdan üretilen mobilya kulplarının yapısal dayanımı açısından endüstriyel ürünlerle rekabet edebilirliğini ortaya koymak amacıyla tartışılmıştır. Ayrıca test sonuçlarının istatistiksel analizi göstermiştir ki, metal kulplar hem paralel hem dik yönde %100 başarı göstermiştir. PETG gri renkli ve %50 dolgu oranına sahip numuneler ise paralel yönde %80, dik yönde %20 başarı oranı ile en zayıf grup olarak belirlenmiştir. PETG %50 dolgu oranına sahip diğer numuneler paralel yönde %80, dik yönde %60 başarı göstermiştir. Buna karşılık, her iki renk için %80 dolgu oranına sahip PETG numuneleri hem paralel hem dik yönde %100 başarı sağlamıştır. Gerçekleştirilen "geçti/kaldı" testlerinde, PETG malzeme ile basılmış numunelerin yaklaşık %85'inin test yükü altında bütünlüğünü koruduğu ve "geçti" olarak sınıflandırıldığı belirlenmiştir. "Kaldı" olarak değerlendirilen örneklerin büyük bir kısmında, baskı yönüne dik uygulanan kuvvetler sonucu katman ayrılması (delaminasyon) veya bağlantı bölgelerinde çatlama gözlemlenmiştir. Bu, FDM tabanlı üretimde sıkça karşılaşılan, katmanlar arası yapışmanın yetersiz kalmasıyla ilgili bilinen bir zayıflığı yansıtmaktadır (Górski ve ark. 2024). Hasar bölgeleri incelendiğinde, genellikle bağlantı deliklerinin çevresinde veya montaj sırasında vidalama yapılan alanlarda yoğunlaştığı görülmüştür. Bu durum, PETG malzemenin özellikle keskin köşe veya stres birikimi olan alanlarda kırılma davranışları sergileyebileceğini ortaya koymaktadır. Literatürde de benzer şekilde, PETG'nin elastik deformasyonu tolere edebilmesine rağmen ani yüklenmelerde yüksek stres noktalarında kırılmalar gösterebildiği bildirilmiştir (Budzinski ve Federowicz, 2025). Literatürde benzer şekilde, PETG'nin elastik deformasyonu tolere edebilmesine rağmen ani yüklenmelerde yüksek stres noktalarında kırılmalara uğrayabileceği raporlanmıştır (Ertek, 2025). Ayrıca, baskı parametreleri ve malzeme geometrisinin mekanik performansı doğrudan etkilediği ve katman yönüne bağlı kırılma riskini artırabileceği çeşitli çalışmalarla desteklenmiştir (Ergene ve ark., 2023; Kuruoğlu ve ark., 2022). Bu bulgular, FDM tabanlı PETG üretiminde, özellikle bağlantı noktalarında ve keskin köşelerde meydana gelen zayıf bölgelerin mekanik dayanımını artırmak için baskı parametrelerinin optimizasyonu ve post-process işlemlerinin önemini ortaya koymaktadır.

4 Sonuçlar ve Öneriler

Günümüzde teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte, 3B yazıcı sistemleri birçok sektörde önemli bir yer edinmiştir. Özellikle inşaat, tıp, otomotiv, savunma sanayi, mühendislik ve mimarlık gibi alanlarda, hem prototipleme hem de son kullanım ürünlerinin üretiminde 3B yazıcıların yaygın kullanımı dikkat çekmektedir. Bu sistemler, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında oluşturulan modellerin, G kodları aracılığıyla katmanlı üretim prensibiyle fiziksel nesnelere dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, farklı renklerde Pet-G filament kullanılarak %50 ve %80 doluluk oranlarında 3B yazıcıyla üretilen mobilya kulplarının dayanımını test ederek, bu parçaların performansını geleneksel metal kulplarla karşılaştırmak ve plastik kulpların alternatif olarak kullanılıp kullanılamayacağını değerlendirmektir. Çıkan sonuçlar:

- Kulp malzemesi, renk ve dolgu oranı mekanik dayanımı önemli ölçüde etkilemiştir. Deneylerde bu değişkenlerin farklı kombinasyonları, parçaların hem

paralel hem de dik yöndeki yüklemelere karşı gösterdiği dirençte belirgin farklar oluşturmuştur.

- Testler, her senaryo için beş tekrar yapılarak gerçekleştirilmiş ve bu sayede malzemelerin tutarlılığı ile dayanım davranışları güvenilir şekilde gözlemlenmiştir.
- Düşük dolgu oranına sahip (%50) örneklerde, özellikle dik yönlü yüklemelerde katmanlar arası ayrılmalar ve vida bağlantı noktalarında erken deformasyonlar meydana gelmiştir. Bu durum, dolgu oranının yapısal bütünlük üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymuştur.
- Dolgu oranı arttıkça (özellikle %80) Pet-G malzemenin mekanik dayanımı belirgin şekilde iyileşmiştir. Yüksek dolgu, vida bölgelerinde oluşabilecek hasarları azaltarak parçanın genel dayanımını artırmıştır.
- Beyaz renkli Pet-G örnekleri, aynı dolgu oranına (%50) sahip gri renklilere kıyasla daha geç deformasyona uğramıştır. Bu farkın, renk pigmentlerinin üretim sürecine veya malzeme yapısına etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Metal kulplar, tüm testler boyunca en yüksek mekanik performansı göstermiş ve herhangi bir deformasyon belirtisi göstermemiştir. Bu, metalin diğer malzemelere kıyasla yük taşıma kapasitesinin çok daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Test sonuçları doğrultusunda, mekanik dayanımın artırılması için özellikle dik yönlü yüklemelere maruz kalacak parçalarda yüksek dolgu oranı (%80 ve üzeri) tercih edilmelidir. Pet-G malzemesi, yüksek dolgu oranlarında başarılı performans gösterdiğinden, yapısal bütünlüğün kritik olduğu uygulamalarda güvenle kullanılabileceği düşünülmektedir. Renk pigmentlerinin malzeme dayanımı üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, üretim sürecinde mümkünse pigment katkısı düşük veya nötr renkli (örneğin beyaz) malzemeler tercih edilmelidir. Ayrıca, tekrarlı yüklemelere maruz kalacak bağlantı noktalarında, vida bölgelerinin dayanımını artırmak amacıyla metal kulp gibi daha rijit ve sağlam çözümler önerilmektedir. Bu bulgular, ürün tasarımı ve malzeme seçiminde daha güvenli, uzun ömürlü ve fonksiyonel çözümler geliştirilmesi açısından yol gösterici olacaktır.

Yazar Katkıları

Sedanur Şeker: Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), Metodolojinin belirlenmesi, Araştırmanın yapılması, Analizlerin yapılması, Veri iyileştirme, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma, inceleme ve düzenleme.

Finansal destek beyanı

Finansal destek alınmamıştır.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması beyan etmemiştir.

Kaynaklar

Aiman, A. F., Sanusi, H., Haidiezul, A. H. M., and Cheong, H. Y., (2020). Design and structural analysis of 3B printed modular furniture joints, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 27 February, 932(1), 012101, Penang, Malaysia, DOI: [10.1088/1757-899X/932/1/012101](https://doi.org/10.1088/1757-899X/932/1/012101)

Akkaş, G., and Güzel, E., (2021). Strength of a chair renovated with additive production systems and reverse engineering approach, *European Journal of Science and Technology*, 32, 1150–1155, DOI: [10.31590/ejosat.1054613](https://doi.org/10.31590/ejosat.1054613)

- Branowski, B., Starczewski, K., Zablocki, M., and Sydor, M., (2020). Design issues of innovative furniture fasteners for wood-based boards, *BioResources*, 15(4), 8472–8483, DOI: [10.15376/biores.15.4.8472-8495](https://doi.org/10.15376/biores.15.4.8472-8495)
- Budzinski, B., and Federowicz, K., (2025). Evaluation of PLA and PETG as 3d-printed reference materials for compressive strength testing, *Materials*, 18(16), 3794, DOI: [10.3390/ma18163794](https://doi.org/10.3390/ma18163794)
- Chen, C. H., Yang, Y. Y., and Liu, H. Y., (2023). Study on the application of 3D printing to wooden furniture connectors, *Journal of Physics Conference Series*, 19-21 May, 2631(1), 012006, Kenting, Taiwan, DOI: [10.1088/1742-6596/2631/1/012006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2631/1/012006)
- Demirtaş, F., ve Kılıç, E., (2023). Sürdürülebilir ahşap mobilya aksesuar üretimi: Çevresel yaklaşımlar, *Çevre Teknolojileri Dergisi*, 18(1), 58–68.
- Ergene, B., Ispartalı, H., ve Karakılınç, U., (2023). Eriyik yığma modelleme ile üretilen PETG parçaların katman yüksekliğine ve test sıcaklığına bağlı darbe davranışı, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(3), 1345–1360, DOI: [10.17341/gazimmfd.1065131](https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1065131)
- Ertek, C., (2025). Polietilen Tereftalat glikol (PETG) malzeme kullanılarak eklemeli imalat yöntemi ile elde edilen honeycomb ve T-rib kafes yapıların çekme dayanımlarının araştırılması, *Teknik Meslek Yüksekokulları Akademik Araştırma Dergisi*, 4(1), 39–48.
- Ekmekçioğlu, D., (2024). Endüstriyel tasarımda sürdürülebilirlik girdisinin mobilya endüstrisi üzerinden değerlendirilmesi, *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 14(2), 686-706, DOI: [10.20488/sanattasarim.1603466](https://doi.org/10.20488/sanattasarim.1603466)
- Górski, J., Kowalczyk, M., and Nowak, P., (2024). Evaluation of 3D-printed connectors in chair construction compared to traditional wood joints, *Journal of Wood Science*, 70(1), 22, DOI: [10.1186/s10086-024-02140-3](https://doi.org/10.1186/s10086-024-02140-3)
- Hsieh, S. H., and Ku, Y. C., (2019). The research on the characteristics of furniture hardware design through 3D printing, *Proceedings of the 4th International Conference on Material Science and Engineering*, 26–31 July, ss. 381–389, Orlando, FL, USA, DOI: [10.1007/978-3-030-23522-2_44](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23522-2_44)
- Jarza, L., Cavlović, A. O., Pervan, S., Spanic, N., Klarić, M., and Prekrat, S., (2023). Additive technologies and their applications in furniture design and manufacturing, *Drvna Industrija*, 74(2), 115–128, DOI: [10.5552/drvind.2023.0012](https://doi.org/10.5552/drvind.2023.0012)
- Kalaycıoğlu, H., Aras, U., ve Çınar, T., (2017). Mobilyada tamamlayıcı elemanlar “aksesuarlar”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 6(3), 1188–1198.
- Kaya, M., and Özkan, S., (2022). Mobilya aksesuarlarında estetik ve fonksiyonellik dengesi, *Tasarım ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, 15(3), 201–215.
- Kuruoğlu, Y., Akgün, M., ve Demir, H., (2022). FDM yöntemiyle üretilen ABS, PLA ve PETG numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımının modellenmesi ve optimizasyonu. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(3), 358–369. DOI: [10.46519/ij3dptdi.1148923](https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1148923)
- Nasir, O., Iqbal, M. F., and Kamal, M. A., (2022). An appraisal of 3D printing technology in interior architecture and product design, *Architecture Engineering and Science*, 3(3), 188–197, DOI: [10.32629/aes.v3i3.1009](https://doi.org/10.32629/aes.v3i3.1009)

- Nicolau, A., Pop, M. A., and Coşereanu, C., (2022). 3D Printing application in wood furniture components assembling, *Materials*, 15(5), 1768, DOI: [10.3390/ma15051768](https://doi.org/10.3390/ma15051768)
- Öztürk, H., ve Yıldırım, S., (2022). Ahşap mobilya aksesuarlarında ergonomi ve kullanıcı deneyimi, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 34(4), 312–326.
- Petrova, B., and Jivkov, V., (2024). Application of 3D printing in furniture construction, *Materials*, 17(19), 4848, DOI: [10.3390/ma17194848](https://doi.org/10.3390/ma17194848)
- Smardzewski, J., Rzepa, B., and Kilic, H., (2016). Mechanical properties of externally invisible furniture joints made of wood-based composites, *BioResources*, 11(1), 1224–1239, DOI: [10.15376/biores.11.1.1224-1239](https://doi.org/10.15376/biores.11.1.1224-1239)
- Svoboda, J., Nováková, A., and Veselý, P., (2023). Print to build: Sustainable assembly of panel furniture using 3D printed connectors, *Sustainability*, 15(24), 16715, DOI: [10.3390/su152416715](https://doi.org/10.3390/su152416715)
- TS 13866, (2019). Mobilya kulpları ve ayakları. Türk standartları enstitüsü, Ankara.
- Uysal, M., (2024). Some printing parameters affecting the screw withdrawal strength of materials used in joints developed in 3D printers for furniture, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 7(2), 150-162, DOI: [10.33725/mamad.1555655](https://doi.org/10.33725/mamad.1555655)



The orientation of growing in black pine wood, heat treatment and alpha-x chemical examination of the effects

Kemal Güler¹, Murat Özalp², Abdurrahman Karaman^{3*}

ABSTRACT: In this study, it was aimed to determine the mechanical properties of larch wood, growing direction, alpha x chemical and the effects of heat treatment. For this purpose, the black pine (*Pinus nigra*) used in the study was obtained from the Kicir Mountain warehouse in the Simav District of Kütahya Province. These samples taken were prepared for the experiment with dimensions of 20x20x30 mm and 20x20x300 mm. The samples were then impregnated with alpha x chemical and subjected to heat treatment. Pressure strength, bending strength, density and elasticity modulus tests were applied to the samples. As a result, it was found that the density and pressure values of the larches grown on the southern side were higher and the elasticity modulus values were lower compared to the larches on the northern side. When larch impregnation was applied, there was a decrease in density and bending values in both respects, while an increase in pressure values was observed. When heat treatment was applied to impregnated larches, an increase in bending and elasticity modulus values was observed in both respects, while a decrease in pressure values was observed.

Keywords: Black pine, growth orientation, alpha-x, immersion method

Karaçam odununda yetiştirme yönü, ısıtma işlem ve alfa-x kimyasalının etkilerinin incelenmesi

ÖZ: Bu çalışmada karaçam odununun mekanik özellikleri, yetiştirme yönü, alfa x kimyasalı ve ısıtma işleminin etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla bu çalışmada kullanılan karaçam tomrukları Kütahya İlinin Simav İlçesine bağlı Kicir Dağı deposundan temin edilmiştir. Alınan bu örnekler 20x20x30 mm ve 20x20x300 mm ölçülerinde deney için hazırlanmıştır. Örnekler daha sonra alfa x kimyasalıyla empenye edilerek ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Örnekler basıncı direnci, eğilme direnci, yoğunluk ve elastikiyet modülü testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, güney bakıda yetişen karaçamların kuzey bakıdaki karaçamlara göre yoğunluk ve basınç değerlerinin daha fazla ve elastikiyet modülü değerlerinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Karaçama empenye uygulandığında her iki bakıda yoğunluk ve eğilme değerlerinde düşüş görülürken basınç değerlerinde artış görülmüştür. Emprenyeli karaçamlara ısıtma işlem uygulandığında her iki bakıda eğilme ve elastikiyet modülü değerlerinde artış görülürken basınç değerlerinde düşüş görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Karaçam, bakı, alfa-x, daldırma yöntemi

1 Introduction

The rapid development of the wood industry has contributed to a continuous decline in forest resources both globally and in Turkey. Wood is increasingly preferred due to its ease of processing, high mechanical strength, thermal and acoustic insulation properties, and aesthetic advantages compared to alternative materials (Özalp, 2003). To meet the growing demand and minimize forest depletion, it is crucial to use existing resources efficiently and conduct scientific studies to better characterize wood raw materials. Otherwise, dependence on imported wood products is expected to increase (Ulusoy et al., 2016).

One of the most effective methods to extend the service life of wood is impregnation. Impregnation involves introducing chemicals into the wood structure through various techniques. Pressure-vacuum impregnation, in particular, provides high-level protection against biological degradation factors such as saline water, soil, moisture, insects, and fungi, potentially increasing wood's service life up to tenfold (Bozkurt et al., 1993). Wood is also frequently exposed to elevated temperatures during service, which can induce physical and chemical changes depending on temperature, duration, pressure, and moisture content (Yılğör, 1999). Heat treatment offers benefits such as improved dimensional stability and biological strength; however, prolonged exposure to high temperatures may reduce mechanical properties due to material loss in cell wall components (Rusche, 1973).

Although wood is a renewable material with ease of processing and high mechanical performance relative to its density, its low biological strength and susceptibility to moisture-induced swelling and shrinkage limit its applications. Heat treatment is widely used to overcome these limitations. It can be applied using steam, oil, vacuum, or inert gas atmospheres and has been shown to improve both physical and mechanical properties. Numerous studies have investigated the effects of heat treatment and chemical impregnation on various wood species. For instance, Doruk et al. (2010) reported that bending strength was the most affected mechanical property in ash and black pine due to heat treatment, along with noticeable darkening of wood colour. Yıldız and Can (2012) observed that increasing temperature and treatment duration in black pine, poplar, spruce, and beech resulted in higher metal loss and corrosion values, while pH decreased, indicating increased acidity. Similarly, Beram (2015) reported reductions in density, volumetric shrinkage-swelling, compressive strength, bending strength, and modulus of elasticity in Iroko wood subjected to 190 °C for 120 minutes via ThermoWood treatment. Doğan (2018) observed decreases in density, bending, and compressive strength in black pine samples impregnated with borax and boric acid after heat treatment at different temperatures. Bal (2020) showed that heat treatment under different atmospheres reduced weight loss, equilibrium moisture content, swelling, and water absorption in black pine, with nitrogen atmosphere exhibiting lower weight loss. Canyılmaz and Yaşar (2022) also reported holocellulose degradation at higher temperatures in red pine subjected to heat treatment and thermomechanical compression, highlighting heat treatment as an effective modification method for both interior and exterior applications. Görgün and Ünsal (2024) investigated the effects of thermo-treatment (thermo-vacuum or Thermovuoto®) carried out in a vacuum environment on dimensional stability. Perçin 2025 showed that reinforced heat-treated LVL samples with glass fibers increased both air dry density and compressive strength parallel to the grain.

Phosphate-based compounds, such as Alpha-X, have recently gained attention as fire retardants. Studies indicate that Alpha-X can be effective up to 1500 °C and can be applied both as an additive and as a surface treatment (Özalp, 2022). Ayhan and Özalp (2019) showed

that Alpha-X lowered the initial weight loss temperature during combustion but increased the final combustion temperature and affected bending strength in Black pine and European beech. Additionally, Özalp (2022) reported that plywood panels containing poplar and beech, bonded with adhesives modified with 10–20% Alpha-X, exhibited reduced free formaldehyde content while experiencing a slight decrease in mechanical performance.

Ayhan and Özalp (2019) investigated the fire resistance of Scots pine (*Pinus sylvestris* Lipsky) and Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) woods impregnated with the fire-retardant chemical Alpha-X. The results indicated that the initial decomposition temperature was lowest in Scots pine treated with 20% Alpha-X (198 °C) and highest in untreated Scots pine (246 °C). The initial decomposition weight loss was lowest in untreated Scots pine (88.8%) and highest in Scots pine treated with 20% Alpha-X (94.3%). The final decomposition temperature was lowest in untreated beech (483 °C) and highest in both pine and beech samples treated with 10% and 20% Alpha-X (600 °C). Overall, the results demonstrated that Alpha-X effectively enhanced the fire resistance of wood, particularly at 10% and 20% concentrations, suggesting its potential use as a protective agent against combustion in wood materials.

The Alpha-X antifire is used as a complement to the polymer and is added to the production processes of various products. It is used in thermoplastic, paint, cable, synthetic, membrane, and wood-based boards. It is effective up to 1500 °C against flammability. Alfa-x was added to the adhesive in 0, 10, and 20 wt% ratios of the total amount of the solid content (Özalp, 2022).

Collectively, these studies demonstrate that impregnation and heat treatment improve the biological strength and dimensional stability of wood, although mechanical properties often decline. Therefore, combining chemical impregnation with moderate heat treatment may optimize performance by minimizing mechanical losses while enhancing durability and stability.

The aim of this study is to investigate the influence of heat treatment on the mechanical properties of black pine (*Pinus nigra*) wood sourced from southern and northern slopes, following impregnation with Alpha-X. After impregnation, the specimens were subjected to four distinct heat treatment regimes, and their bending and compressive strengths were determined using a universal testing machine (UTM).

2 Material and Methods

2.1 Material

In this study, heartwood samples of black pine (*Pinus nigra*) were collected from the northern and southern slopes of Kiçir Village, Simav District, Kütahya Province, Türkiye, at an altitude of 1540 m. All wood materials were obtained from the Kiçir Forest Depot (Figure 1). Naturally dried trees were harvested, and the logs were sawn at a local sawmill to produce the test samples.

2.2 Samples' Preparation

The test samples were prepared at the Workshop of the Department of Woodworking Industrial Engineering, Faculty of Technology, Dumlupınar University, Simav, Türkiye, following standard dimensions. Samples for the bending strength tests measured 20 × 20 × 300 mm, while those for the compression tests measured 20 × 20 × 30 mm. For each slope exposure, 30 samples were prepared for bending strength and 30 samples for compression

tests. Additionally, to determine the density of the wood, 20 samples per exposure were prepared, totalling 60 samples with dimensions of $20 \times 20 \times 30$ mm (Figure 2).



Figure 1. Kicir forest depot

All samples were conditioned in a climate chamber for three weeks to reach equilibrium moisture content. 10 samples per exposure were designated as controls after conditioning. The remaining 20 samples per exposure were impregnated using a 10% Alfa-X solution in water (10% Alfa-X, 90% H₂O) via the dipping method in 10-liter tanks for 4 hours at room temperature. After the impregnation process the samples were drained at room temperature for 1 hour. From each exposure, 10 impregnated samples were returned to the climate chamber, while the remaining 10 samples underwent heat treatment at 250 °C for 4 hours.



Figure 2. Density, bending strength, and compression strength test samples

2.3 Experimental Method

After heat treatment, all samples were evaluated for bending and compression strength using a Universal Testing Machine (UTM). In accordance with the TS 2474 (1976) standard, the bending strength tests were conducted with a support span of 240 mm. The load was applied at a crosshead speed of 20 mm/min at the midpoint of the specimen to ensure a fracture occurred within 0.5–1.0 minutes. The bending strength test setup is illustrated in Figure 3-a.

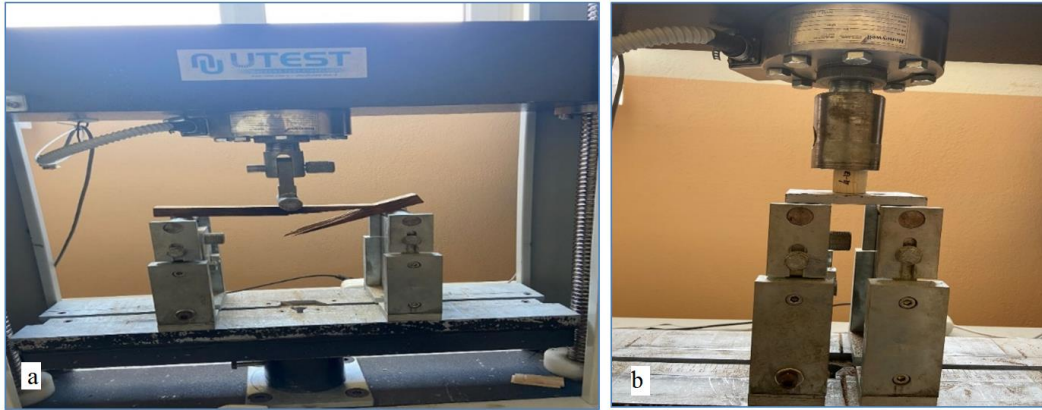


Figure 3. Bending strength (a) and compression strength test setup (b)

The bending strength (MOR) and the elasticity modulus (MOE) have been determined using the following equations:

$$MOR = \frac{3xF_{max} \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (1)$$

In the given context, the variables are defined as follows: bending strength (N/mm²), F_{max} represents the maximum load applied during testing, measured in N. L denotes the distance between the two supports, measured in mm. b represents the width of the test sample, also measured in mm. Lastly, h signifies the thickness of the test sample, measured in mm.

$$MOE = \frac{L_1^3 \times \Delta F}{4 \times b \times h^3 \times \Delta f} \quad (2)$$

In the given context, the variables are defined as follows: the elasticity modulus (N/mm²), ΔF represents the load increment, measured in N. L denotes the distance between the two supports, measured in mm. Δf represents the deflection increment. b signifies the width of the test sample, measured in mm. Lastly, h signifies the thickness of the test sample, also measured in mm. In accordance with the TS 2595 (1976) standard, the compression strength test was conducted at a loading rate of 5 mm/min, ensuring that the test duration was completed within 0.5–1.0 minutes. The test continued until specimen failure, and the maximum force at the point of fracture was recorded for each sample. The compression strength test setup is illustrated in Figure 3-b. The compression strength (σ_b) of the grain test was conducted using an electromechanical universal testing machine (UTM) with a capacity of 10 kN. The following equations calculated the compression strength (σ_b) parallel to grain values.

$$\sigma_b = \frac{F_{max}}{a \times b} \quad (3)$$

In the given context, the variables are defined as follows: σ_b (N/mm²) F_{max} represents the maximum load applied during testing, measured in N. The variable a denotes the width of the

samples, measured in mm. The variable represents the thickness of the samples, also measured in mm.

2.4 Data analyses

The results obtained after the experiments were subjected to a normality test at a 95% confidence level using the SPSS software, and subsequently compared through analysis of variance (ANOVA).

3 Results and Discussions

The physical and mechanical properties of black pine (*Pinus nigra*) wood samples were evaluated separately for north and south oriented sections. Measurements were conducted to determine the density, compressive strength, bending strength, and modulus of elasticity. For each treatment type, the arithmetic mean of ten test specimens was calculated to obtain representative values for these parameters. The summarized results of density, compressive strength, bending strength, and elasticity modulus are presented in Table 1.

Table 1. Density, compression strength, bending strength, and elasticity modulus results based on the type of process applied

Orientation	Process Applied	Statistical Value	Density (g/cm ³)	Compression Strength (N/mm ²)	Bending Strength (N/mm ²)	Elasticity Modulus (N/mm ²)
North	Unprocessed	Xmean	0.726	47.28	98.01	6531.69
		Xmin	0.685	44.96	89.07	6203.65
		Xmax	0.773	51.80	10.37	7262.64
		S	0.29	2.33	5.18	355.21
		V (%)	39.94	4.93	5.28	5.44
	Impregnation	Xmean	0.703	60.66	95.94	7970.16
		Xmin	0.659	53.32	88.51	7241.77
		Xmax	0.755	74.80	103.50	9073.50
		S	0.36	8.85	4.99	673.08
		V (%)	51.21	14.59	5.20	8.44
	Heat Treatment	Xmean	0.715	57.86	100.87	8265.37
		Xmin	0.631	57.43	88.05	6900.17
		Xmax	0.766	63.70	110.09	9999.41
		S	0.44	2.02	6.55	969.29
		V (%)	61.53	3.49	6.49	11.72
South	Unprocessed	Xmean	0.824	62.69	137.15	6039.22
		Xmin	0.756	56.41	118.42	5105.72
		Xmax	0.887	66.37	153.09	7206.59
		S	0.39	2.74	11.95	662.27
		V (%)	47.33	4.37	8.71	10.97
	Impregnation	Xmean	0.822	75.56	81.64	5962.93
		Xmin	0.759	63.70	51.72	5154.73
		Xmax	0.946	79.52	140.70	6906.53
		S	0.56	4.75	28.18	806.52
		V (%)	68.13	6.29	34.51	13.53
	Heat Treatment	Xmean	0.804	65.47	123.47	6010.46
		Xmin	0.765	54.73	111.27	5150.08
		Xmax	0.898	75.28	131.06	7998.45
		S	0.47	7.26	6.21	961.39
		V (%)	58.48	11.09	5.03	15.99

Note: S: the standard deviation; V (%): Coefficient of variation

3.1 Effect of orientation and treatment on density

According to the experimental results of the density change is given in Figure 5, and the mean and changes according to the applied process are given in Figure 6.

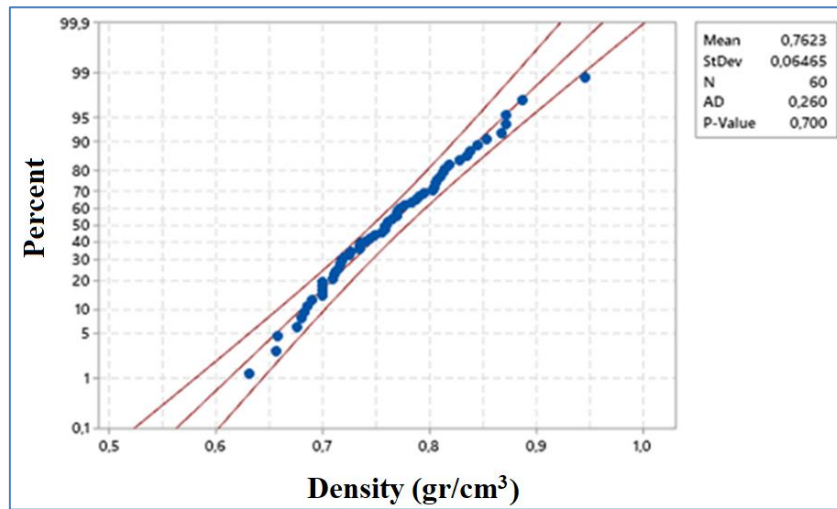


Figure 5. According to the applied process density change

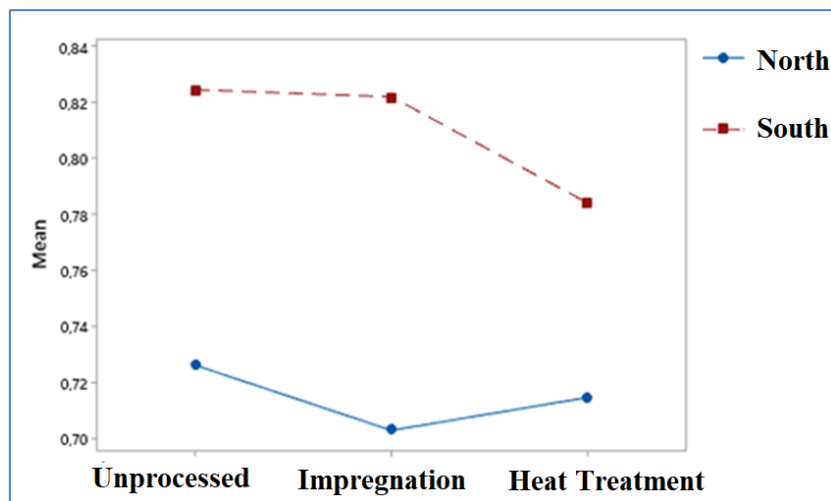


Figure 6. Density changes depending on the mean and applied process

The results presented in Table 1 indicate that the density of the black pine (*Pinus nigra*) wood obtained from the north-oriented samples was lower than that of the south-oriented ones. In other words, the density values increased proportionally toward the south direction. This phenomenon can be explained by the fact that the annual growth rings in south-oriented wood are narrower and denser than those in north-oriented wood, resulting in higher overall density. As illustrated in Figure 6, the density of untreated wood was higher compared to that of both impregnated and heat-treated specimens. This reduction in density following impregnation may be attributed to the dissolution or extraction of low-molecular-weight substances (extractives) during chemical treatment. Among the south-oriented specimens, the untreated wood exhibited the highest density value. The difference between untreated

densities of the north- and south-oriented samples was approximately 11.89%. After impregnation, a slight decrease in density (0.002) was observed in the south-oriented specimens, whereas a more pronounced reduction (0.023) occurred in the north-oriented ones. This difference is primarily associated with the initial density variation between the two orientations. Following heat treatment, the density of the south-oriented wood showed a notable decrease compared to the impregnated condition, while the opposite trend was observed in the north-oriented samples, where a remarkable increase in density was recorded after heat treatment relative to impregnation. In summary, the density of Black pine grown in the northern orientation tended to increase when heat treatment followed impregnation, whereas impregnation alone caused a reduction in density. Conversely, impregnation nor heat treatment contributed to an increase in density for the south-oriented Black pine; instead, both processes resulted in a measurable decrease. These findings suggest that the response of wood density to impregnation and thermal modification is significantly influenced by the growth orientation of the material.

3.2 Effect of orientation and treatment on compression strength

According to the experimental results of the compression strength change is given in Figure 7, and the mean and changes according to the applied process are given in Figure 8.

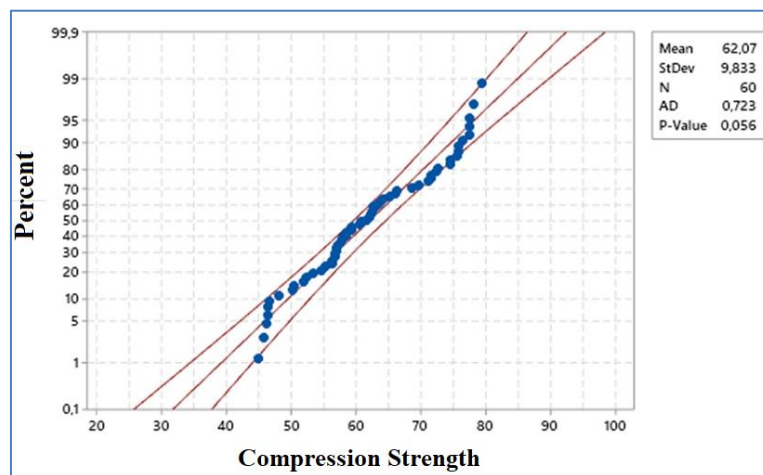


Figure 7. According to the applied process compression strength change

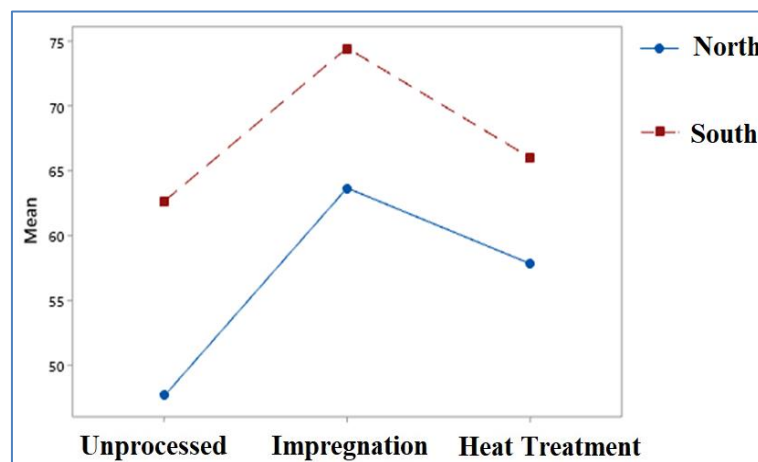


Figure 8. Compression strength changes depending on the mean and applied process

The compressive strength of the black pine (*Pinus nigra*) wood from the north-oriented samples was lower than that of the south-oriented samples, as shown in Table 1. In other words, the compressive strength increased proportionally toward the south direction. This variation can primarily be attributed to the difference in density between the two orientations. Furthermore, the results revealed that the compressive strength of untreated wood was considerably lower compared to those subjected to the Alpha-X impregnation and heat treatment processes. The highest compressive strength value was obtained after the Alpha-X treatment. According to Figure 8, the impregnation process led to the highest compressive strength in both the north- and south-oriented specimens. However, when heat treatment was applied following impregnation, a notable decrease in compressive strength was observed in both orientations. The difference between the untreated compressive strength values of the south- and north-oriented samples was approximately 24.58%. This difference may be associated with the higher lignin content in the south-oriented wood, which enhances its compressive load-bearing capacity. After impregnation, a significant increase in compressive strength was recorded in both orientations. Conversely, subsequent heat treatment caused a noticeable reduction in compressive strength compared to the impregnated state. Overall, the results indicate that impregnation treatment improves the compressive strength of Black pine grown in both north and south orientations, whereas the combination of impregnation and heat treatment tends to reduce it. These observations are consistent with the density variations discussed earlier, confirming the strong correlation between density and compressive behavior in thermally and chemically modified Black pine.

3.3 Effect of orientation and treatment on bending strength

According to the experimental results of the bending strength change is given in Figure 9, and the mean and changes according to the applied process are given in Figure 10. As illustrated in Figure 9, the bending strength data exhibited a normal distribution at a 95% confidence level. According to Table 1, the bending strength values of the black pine (*Pinus nigra*) obtained from the north-oriented specimens was lower than those from the south-oriented specimens. In other words, the bending strength increased proportionally toward the south direction. This difference may be attributed to the higher cellulose content observed in the south-oriented wood, which enhances the tensile and bending performance of the fibers.

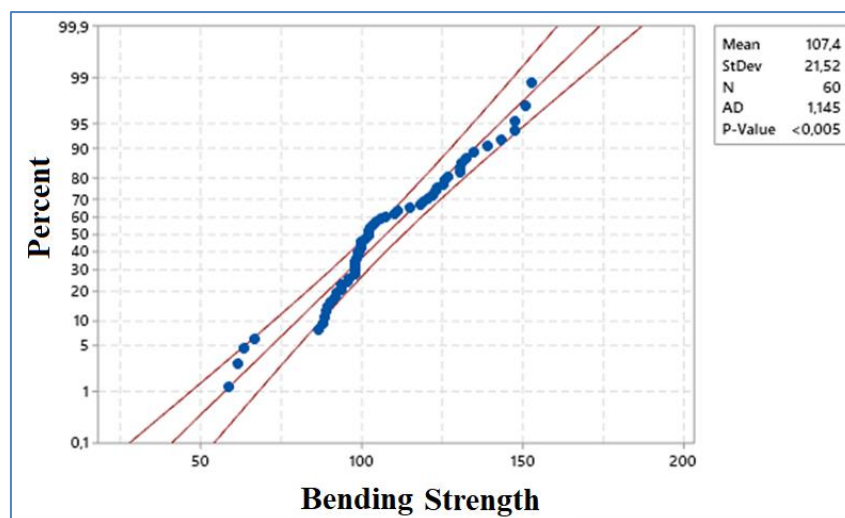


Figure 9. According to the applied process bending strength change

As shown in Figure 10, the bending strength of the chemically untreated but heat-treated south-oriented wood was higher than that of the north-oriented samples. In contrast, the lowest bending strength value was recorded in the north-oriented impregnated specimens. The highest bending strength was obtained in the untreated Black pine samples from the south orientation. The difference between the untreated bending strengths of the south- and north-oriented woods was approximately 28.5%. When impregnation treatment was applied, a slight decrease (2.07 MPa) in bending strength was observed in the north-oriented samples, while a more pronounced reduction (55.51 MPa) occurred in the south-oriented samples. Following heat treatment, however, the bending strength of the south-oriented wood increased notably compared to that of the impregnated condition. Overall, it was determined that impregnation treatment decreased the bending strength of the black pine grown in the southern orientation, whereas subsequent heat treatment of impregnated wood resulted in a noticeable improvement in bending strength. In summary, both impregnation and heat treatment did not enhance the bending performance of Black pine grown on the southern slope; instead, they tended to reduce it. These findings suggest that the effect of chemical and thermal modification on bending behaviour is highly dependent on the growth orientation of the wood material.

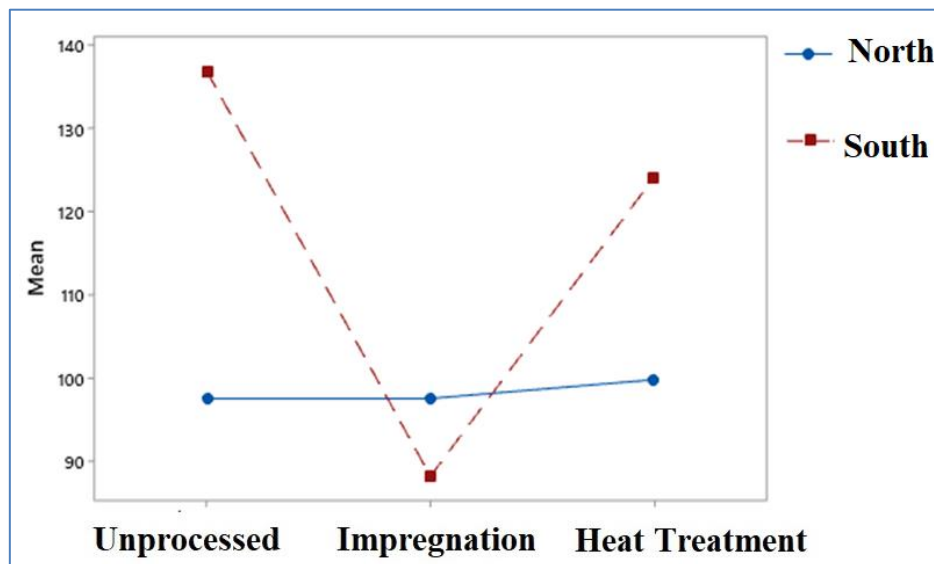


Figure 10. Bending strength changes depending on the mean and applied process

3.4 Effect of orientation and treatment on elasticity modulus

The change in bending strength according to the experimental results is given in Figure 1, and the mean and changes according to the applied process are given in Figure 12. It was observed that the modulus of elasticity (MOE) data exhibited a normal distribution at the 95% confidence level (Fig. 11). As presented in Table 1, the bending strength of black pine (*Pinus nigra*) wood obtained from the northern orientation was higher than that from the southern orientation, indicating that the MOE increased proportionally toward the north direction. Examination of Fig. 12 further revealed that the MOE values of untreated, impregnated, and heat-treated specimens from the northern direction were consistently higher than those from the southern direction. The lowest MOE value was recorded in impregnated samples from the southern direction, whereas the highest MOE value was observed in heat-treated samples from the northern direction. A comparison between untreated specimens showed approximately a 7.54% higher MOE in the north-oriented samples than in the south-oriented

ones. Following impregnation, a slight reduction (by 76.29 units) in MOE was observed in the southern direction, while a pronounced increase (by 1438.47 units) occurred in the northern direction. After heat treatment, the MOE in the north direction exhibited a substantial increase compared with the impregnated condition. Overall, the findings indicate that both impregnation and heat treatment enhance the elastic performance of Scots pine grown under northern exposure conditions. These treatments did not cause deterioration in stiffness; on the contrary, they contributed to a considerable improvement in the modulus of elasticity of wood originating from the northern slopes.

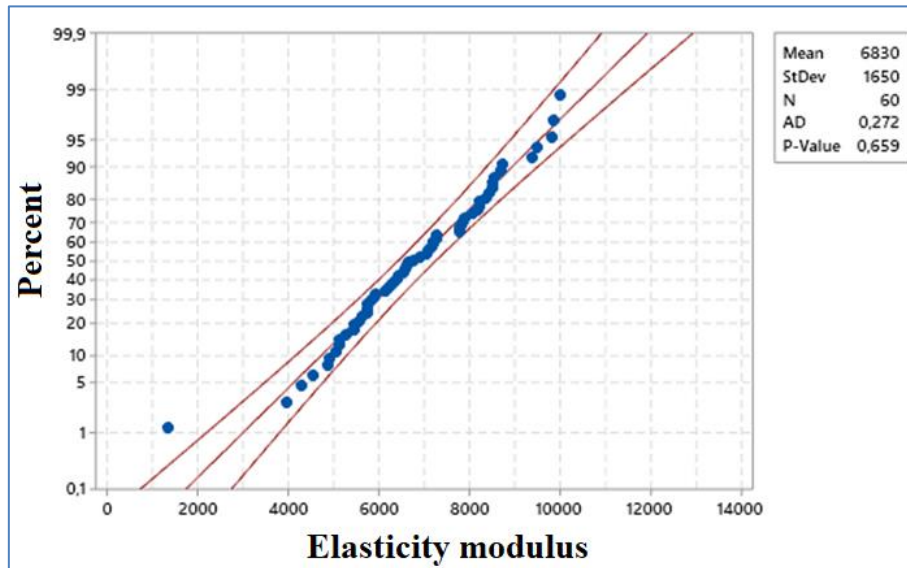


Figure 11. According to the applied process elasticity modulus change

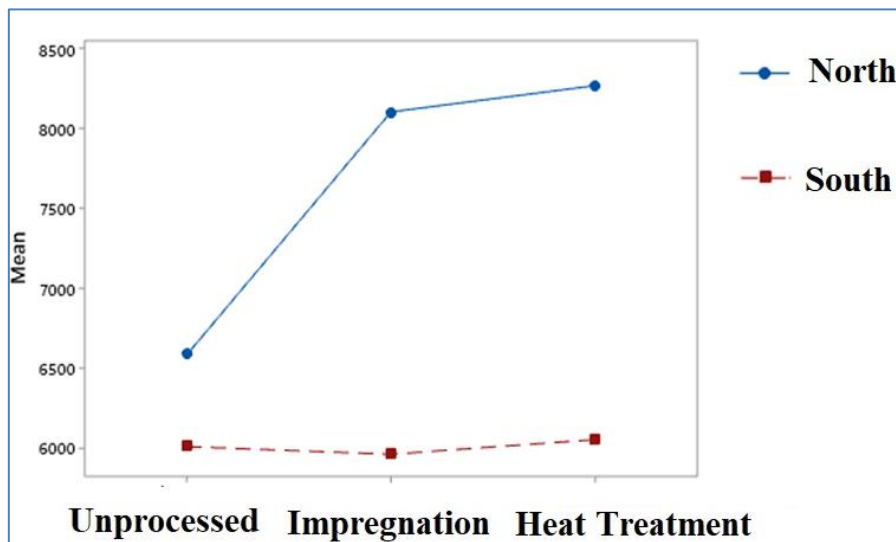


Figure 12. Elasticity modulus changes depending on the mean and applied process

4 Conclusion

In this study, titled “Investigation of the Effects of Growth Orientation, Thermal Treatment, and Alpha-X Chemical on black pine (*Pinus nigra*)”, the influence of orientation, thermal modification, and chemical impregnation on the physical and mechanical properties of the material was comprehensively examined.

- The results demonstrated that thermal treatment caused an approximate 10% decrease in the density of wood samples obtained from both the north and south orientations. While an increase in compressive strength was observed, mainly attributed to the lignin content, a noticeable reduction in bending strength occurred, which is influenced by cellulose.
- The thermal degradation sequence of the main wood polymers can explain this behaviour. During thermal treatment, cellulose degradation occurs earlier than that of lignin, leading to a decrease in bending strength. The observed increase in compressive strength, on the other hand, can be attributed to the fact that lignin had not yet reached its degradation temperature. Lignin begins to thermally decompose at relatively higher temperatures, typically between 350°C and 400°C, whereas cellulose decomposes at lower temperature ranges.
- In the part of the study focusing on the effect of the Alpha-X chemical, two experimental groups were prepared: one group of samples was impregnated with the Alpha-X chemical before thermal treatment, while the other group was thermally treated without chemical application. The findings revealed that the use of the Alpha-X chemical before thermal treatment negatively affected both the bending and compressive strength values of Black pine wood. This indicates that chemical impregnation before heat exposure may weaken the internal bonding structure within the wood cell wall.
- It is also noteworthy that all wood samples used in this study were obtained from trees harvested outside the vegetation (active growth) period. For future research, it is recommended that wood samples be collected from trees during the active vegetation period, allowing for further investigation into how seasonal growth conditions interact with chemical and thermal treatments. Such studies would provide a deeper understanding of how combined modification processes influence the physical, mechanical, and structural behaviour of the black pine wood.

Acknowledgement

This work is derived from the xxx master's thesis titled "The orientation of growing in black pine wood, heat treatment and alpha-x chemical examination of the effects" conducted in Kütahya Dumlupınar University, Department of Advanced Technologies, Kütahya, Türkiye.

Author Contributions

Kemal Güler: Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Supervision, Validation, Visualization, Writing- original draft, Writing-review & editing, **Murat Özalp** Conceptualization, Investigation, Methodology, Resources, Validation, Visualization, Writing-original draft. **Abdurrahman Karaman:** Formal Analysis, Writing-original draft,

Funding Statement

This project was not supported by any organisation.

Conflict of Interest Statement

The authors declare no conflict of interest.

References

Ayhan, A.T., and Özalp, M., (2019). Some technological properties of Scotch pine (*Pinus Sylvestris* Lipsky) and eastern beech (*Fagus Orientalis* Lipsky) woods impregnated with alpha-X chemical, *Politeknik Dergisi*, 22(4), 871–877, DOI: [10.2339/politeknik.481589](https://doi.org/10.2339/politeknik.481589)

- Bal, B. C., (2020). Karaçam odununun fiziksel özellikleri üzerine farklı atmosferde uygulanan ısıt işlemin etkisi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 236-244. DOI: [10.17780/ksujes.771516](https://doi.org/10.17780/ksujes.771516)
- Beram, A., (2015). *Isıl işlem görmüş ağaç malzemenin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi: İroko örneği*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. Isparta.
- Bozkurt, A. Y., Göker, Y., Erdin, N., (1993). *Emprenye tekniği*. İstanbul: İstanbul Orman Fakültesi
- Canyılmaz, A., ve Yaşar, S., (2022). Yoğunlaştırmanın ısıt işlem görmüş kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) odunlarının bazı fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri üzerine etkisi. *Turkish Journal of Forestry*, 23(4), 320-327, DOI: [10.18182/tjf.1181308](https://doi.org/10.18182/tjf.1181308)
- Doğan, B., (2018). *Boraks ve borik asit ile emprenye edilmiş ve ısıt işlem görmüş karaçam odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Doruk, Ş., Altınok, M., ve Perçin, O., (2010). Isıl işlemin ağaç malzemenin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(3), 262-270.
- Görgün, H. V., ve Ünsal, Ö., (2024). Termo-vakum işlem görmüş sarıçamın boyutsal kararlılığının incelenmesi, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 7(2), 163-171. DOI: [10.33725/mamad.1520817](https://doi.org/10.33725/mamad.1520817)
- Özalp, M., (2003). *Su itici ve koruyucu emprenye maddeleri ile muamele edilmiş çam örneklerinin su soğutma kulelerinde kullanımı ile fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimin incelenmesi*, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Bartın.
- Özalp, M., (2022). Study of the effect of Alfa-x to the urea formaldehyde adhesive on plywood, *Politeknik Dergisi*, 25(2), 513-518, DOI: [10.2339/politeknik.769304](https://doi.org/10.2339/politeknik.769304)
- Perçin, O. (2025). Performance properties of heat treated and reinforced laminated veneer lumber with glass fiber, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 8(1), 156-171, DOI: [10.33725/mamad.1699980](https://doi.org/10.33725/mamad.1699980)
- Rusche, H., (1973). Thermal degradation of wood at temperatures up to 200 °C part I; strenght properties of dried wood after heat treatment. *Holz Roh- u. Werkstoff*, 31(8), 307-312.
- TS 2474, (1976). Odunun statik eğilme dayanımının tayini, TSE, Ankara.
- TS 2595, (1976). Odunun liflere paralel doğrultuda basınç dayanımı tayini, TSE, Ankara.
- Ulusoy, H., Atılğan, A., and Peker, H., (2016). Effect on bedding strength and modulus of elasticity of some wood species to natural dye obtained from plant extracts (TEA), II. International Furniture Congress, 13-15 Ekim 2016, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla/Türkiye.
- Yıldız, S., ve Can, A., (2011). Isıl işlem uygulanmış ladin, karaçam, kayın ve kavak odunlarının korozyon özellikleri, I. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu, 26-28 Ekim 2011, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş/Türkiye.
- Yılğör, N., (1999). Sıcaklığın odunun kimyasal bileşenleri üzerine etkileri, *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 49(1-2-3-4), 77-82.



Emprenye ve ısıtıl işlemin karaçam (*Pinus nigra*) ağacının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkileri

Bilal Doğan¹ , Osman perçin² ,

ÖZ: Bu çalışmada, bor bileşikleriyle emprenye işleminden sonra farklı sıcaklıklarda uygulanan ısıtıl işlemin ahşap malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, deney örnekleri %1, %3 ve %5 konsantrasyonlarında boraks (Bx) ve borik asit (Ba) çözeltileriyle 48 saat daldırma yöntemiyle emprenye edilmiş ve ardından 150°C, 170°C, 190°C ve 210°C'de üç saat ısıtıl işlem uygulanmıştır. Deney örneklerinin hava kurusu yoğunluk, liflere paralel basınç direnci (BD) ve eğilme direnci (ED) değerleri belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, ısıtıl işlem uygulanmış deney örneklerinde yoğunluk değerlerinin, artan ısıtıl işlem sıcaklığıyla azaldığını göstermiştir. Öte yandan, bor bileşikleriyle ısıtıl işlem uygulanmamış deney örneklerinin yoğunluk değerlerini artırmıştır. Bor bileşikleriyle emprenye işlemi ve ısıtıl işlem uygulaması deney örneklerinin BD özelliklerinde hafif bir artışa neden olmuştur. Ayrıca, emprenye edilmiş ve ısıtıl işlem uygulanmış deney örneklerinin ED değerleri, düşük sıcaklıklarda arttığı, yüksek sıcaklıklarda ise azaldığı tespit edilmiştir. ısıtıl işlem sırasında ED ve BD özelliklerinde görülen azalmaların, ısıtıl işlemden önce bor bileşikleriyle emprenye edilmesiyle hafifletildiği ve Bx ve Ba emprenye çözeltilerinin sırasıyla BD ve ED özellikleri üzerinde daha olumlu etkilere sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bor, ısıtıl işlem, Karaçam, Fiziksel ve mekanik özellikler

Effects of impregnation and heat treatment on the physical and mechanical properties of black pine (*Pinus nigra*) wood

ABSTRACT: In this study, the effect of impregnation with boron compounds followed by heat treatment at different temperatures on the physical and mechanical properties of wood material was investigated. For this purpose, samples were impregnated with borax (Bx) and boric acid (Ba) solutions at concentrations of 1%, 3%, and 5% using the immersion method for 48 hours, and then subjected to heat treatment at 150°C, 170°C, 190°C and 210°C for three hours. The air-dry density, compressive strength parallel to the grain (CS), and modulus of rupture (MOR) of the test samples were determined. The results indicated that air-dried density of heat-treated samples decreased with increasing heat treatment temperature. On the other hand, boron compounds increased air-dried density. The impregnation with boron compounds and heat treatment causes a slightly increase in CS properties of samples. It was also found that the MOR values of impregnated and heat treated samples increased at the initial stage of the heat treatment and decreased later. It was also determined that the decreases in MOR and CS during heat treatment were alleviated by impregnation with boron compounds before heat treatment and also the Bx and Ba impregnation solution was more favourable on the CS and MOR properties, respectively.

Keywords: Boron, Heat treatment, Black pine, Physical and mechanical properties

1 Giriş

Ahşap, insanoğlu tarafından kullanılan en eski yapı malzemelerinden biri olup, günümüzde konut, mobilya, dekorasyon elemanları ve ağaç işleri endüstrisi de dahil olmak üzere birçok yaygın kullanım alanına sahiptir (Ayata, 2024; Bal ve ark., 2023). Ahşabın dayanıklılığı, işlenebilirliği ve estetik çekiciliği, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, ses yalıtım ve akustik performans özellikleri, elektriksel iletkenliğin olmaması ve sıcaklık kararlılığı gibi olumlu özellikleri onu olağanüstü ve popüler bir yapı malzemesi haline getirmektedir (Zhang ve ark., 2020). Ahşap mükemmel bir yenilenebilir yapı malzemesi olmasına rağmen, dış mekan koşullarında bozunması ve çevredeki bağıl nemdeki dalgalanmalara bağlı olarak boyutsal kararsızlığı, biyolojik saldırılara maruz kalması, hava koşullarına maruz kaldığında görünümünde değişiklikler olması ve kolay yanması gibi bazı dezavantajları vardır (Keskin ve ark., 2009; Sevim Korkut ve Hızıroğlu, 2014).

Ahşabın kullanımını kısıtlayan olumsuz ve istenmeyen özelliklerini ortadan kaldırmak için ahşap modifikasyon yöntemleri (emprenye, ısıl işlem, kimyasal) geliştirilmiştir (Sandberg ve ark., 2017; Jones ve Sandberg, 2020). Ahşap modifikasyonu, ahşabın olumsuz özelliklerini değiştirmek veya performansını iyileştirmek anlamına gelmektedir. Etkili bir ahşap modifikasyon işlemi, ahşabın çürükçül mantarlara ve boyut stabilitesine karşı direncini artırmakta, su emilimini azaltmakta ve dış hava koşullarına karşı direncini geliştirmektedir (Hill, 2006). Ayrıca ahşap malzemenin performansını iyileştirmeye ve daha işlevsel hale getirmeye de katkıda bulunmaktadır (Zelinka ve ark., 2022).

Kimyasal modifikasyon, ahşap endüstrisindeki geleneksel yöntemlerden biri olup, son yıllarda kimyasal ahşap modifikasyon teknolojilerine olan ticari ilgi artmaktadır. Ahşabın kimyasal modifikasyonu, bir reaktifin ahşabın polimerik bileşenleriyle (selüloz, hemiselüloz ve lignin,) kimyasal reaksiyona girmesiyle gerçekleşir ve bu da reaktif ile hücre duvarı polimerleri arasında kararlı bir kovalent bağın oluşmasıyla sonuçlanır (Bari ve ark., 2019).

Bir diğer odun modifikasyon yöntemi ahşap malzemenin emprenye (kimyasal emdirmeye) edilmesidir. Ahşaba kimyasal emdirmeye işlemi, hücre duvarlarının belirli bir kimyasal karışım veya inert bir malzeme (emprenye edici maddeler) ile doyurulmasını içerir. Bu emdirmeye yönteminin temel amacı, rutubet girişini kısıtlamak, ahşabın özelliklerini değiştirmek, ömrünü uzatmak ve çürümesini azaltmaktır (Hill, 2006; Liao ve Mubarak, 2024). Ahşap malzemeler için en yaygın uygulanan koruma yöntemi, kullanım alanına göre uygun bir kimyasal ve yöntemle modifikasyon yöntemidir (Şen ve Hafizoğlu, 2001).

Bor bileşikleri, toksik olmaması, çevre dostu olması, düşük maliyeti, selülozik malzemelerde yüksek termal ve biyolojik direnç açısından yangın geciktirici olması ve ayrıca termit ve böcek gibi zararlılara karşı etkili olması gibi özellikleri nedeniyle son yıllarda ahşap koruma endüstrisinde öne çıkmış ve yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Çavdar ve ark., 2015). Bor bileşiklerinin uygulaması kolaydır ve ahşaba iyi nüfuz etme kabiliyetlerine sahiptirler. Ucuz ve kolay bulunabilmeleri, memeliler için ihmal edilebilir düzeyde toksisiteye sahip olmaları, aşındırıcı özellikleri olmaması ve ahşabın yanmaya karşı direncini önemli ölçüde artırmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Baysal, 2003; Aşçı, 2016). Geçmişte geleneksel olarak kullanılan emprenye maddeleri kreozot, bakır-krom-arsenik (CCA), Bakır/Krom/Bor (CCB), Pentaklorofenol (PCP), Boliden K33, Tanalith-CBC ve son yıllarda kullanımı artan Amonyaklı Bakır Quat (ACQ)'tır (Bal, 2006). Ancak son yıllarda, çevre koruma derneklerinin baskısı, artan çevresel kaygılar ve bu kimyasalların kullanımının sınırlandırılmasına ilişkin yönetmeliklerin uygulanması nedeniyle yakın zamanda birçok ülkede

bu kimyasalların kullanımı sınırlandırılmıştır. Ağaç işleri endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bu kimyasalların ekolojik dengeyi bozduğu ve insan ve diğer canlıların sağlığını tehdit ettiği yönünde ciddi araştırma sonuçları vardır (Aşçı ve Keskin, 2021).

Bor bileşiklerinin ahşap koruma endüstrisinde kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Buna karşın bor çözeltileri ile emprenye edilen deney örnekleri dış ortam şartlarına maruz bırakıldığında, bor bileşikleri kolayca yıkanarak ahşap malzemeden uzaklaşmaları, en önemli dezavantajlarının başında gelmektedir. Bu dezavantajın üstesinden gelmek için bor bileşiklerinin odun hücre duvarlarında daha fazla tutunması ve yıkanmasının azaltılması üzerine çalışmalar mevcuttur (Dauvergne ve ark., 2000; Kartal ve Imamura, 2004; Kartal ve ark., 2009).

Ağaç malzemenin bazı özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bir diğer etkili yöntem ise ısıtma işlemidir. Isıtma işlemi uygulanması son yıllarda önemli ölçüde artmış ve bazı ağaç özelliklerini iyileştirmek için endüstriyel bir işlem olarak büyümeye devam etmektedir (Esteves ve Pereira, 2009). Isıtma işlemi uygulamasında kimyasal madde kullanılmadığından dolayı çevreci bir odun modifikasyon yöntemi olarak değerlendirilmektedir (Johansson, 2008). Isıtma işlemi ağaç malzemenin boyutsal kararlılığını ve biyolojik direncini iyileştirirken, uygulanan ısıtma işlemi koşullarına bağlı olarak mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Isıtma işlemi sonucu mekanik özelliklerde meydana gelen azalmalar, ağaç malzemenin mekanik dayanım gerektiren farklı yük taşıyıcı sistemlerdeki kullanımını sınırlamaktadır (Şimşek Türker ve ark., 2024). Isıtma işleminin ahşap malzemenin direnç özellikleri üzerindeki etkisi karmaşık bir durum olmakla birlikte etkinin büyüklüğü, ağaç türü, uygulama sıcaklığı ve süresi, ısıtma ortamı, ahşabın nem içeriği ve atmosfer basıncı gibi belirli parametrelere bağlı olduğu değişmektedir (Fengel ve Wegener, 1984).

Awoyemi ve Westermarck (2005) tarafından yapılan çalışmada, ısıtma işleminin ahşap malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak için, deney örnekleri öncelikle bor tuzları ile emprenye edilmiş ve ardından ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak bor emdirmenin ısıtma işlemi sırasındaki direnç kayıplarının şiddetini azalttığı ve bunun alkalinin deney örneklerinin asiditesi üzerindeki tamponlayıcı etkisinden kaynaklandığını belirtmektedir. Awoyemi (2008) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise huş (*Betula pubescens*) ağacı örnekleri 0.1, 0.3 ve 0.5 M sodyum borat çözeltisi ile emprenye edilmiş ve 200 °C'de 4 saat boyunca ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Borat tuzunun ısıtma işlemi sırasında mukavemet kaybı derecesi üzerindeki azaltıcı etkisinin, konsantrasyonun 0.1 M'den 0.3 M'ye artmasıyla önemli ölçüde arttığını bildirmiştir. Ancak, 0.3 ve 0.5 konsantrasyon seviyelerinde bor tuzu ile emprenye edilmiş numuneler arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. Başka bir çalışmada Kartal ve ark., (2008), borik asit (BA) ve disodyum oktoborat tetrahidratın (DOT) emdirme ve ısıtma işleminin Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) ağacının kimyasal ve direnç özellikleri üzerinde etkilerini analiz etmişlerdir. Çalışmada, ısıtma işlemi sıcaklığına bağlı olarak direnç özellikleri ile hemiselüloz kayıpları arasında doğrudan bir ilişki olduğu ve deney örneklerinin hemiselüloz içeriği azaldıkça kopma modülündeki (MOR) kayıpların arttığı bildirilmiştir. Ayrıca, borik asit (BA) ve disodyum oktoborat tetrahidratın (DOT) deney örneklerinin pH değerini belirgin bir şekilde değiştirdiğini, ayrıca emprenye edilen örneklerin MOE değerlerindeki kayıpların, emprenye edilmeyen örneklerden daha az olduğunu bildirmişlerdir. Diğer yandan asidik yangın geciktirici kimyasallar ve yüksek sıcaklık kombinasyonunun ahşap bileşenlerinin asidik hidroliz hızını artırdığı ve böylece ahşap malzemede direnç kayıplarına neden olduğu düşünülmektedir (LeVan ve Winandy, 1990).

Isıl işlem uygulanmış ahşap malzeme döşeme, güverte, pencere ve kapı doğramaları, paneller, bahçe mobilyaları, sauna duvarları ve mobilyaları gibi birçok uygulamada kullanım alanı gün geçtikçe artmaktadır ve ahşap işleri endüstrisindeki pazar payı artarak devam etmektedir (Yıldız ve ark., 2006, Özçifçi ve ark., 2009). Bor bileşikleri uzun yıllardır ahşap koruma endüstrisinde fungusit ve insektisitlere karşı kullanılmakta ve özellikle termitlere karşı etkili olmaktadır. Bor bazlı kimyasallar ayrıca yangın geciktirici emprenye maddesi olarak kullanılmakta olup ve termal bozulmanın şiddetini önemli ölçüde azalttığı bulunmuştur (Winandy, 1997).

Literatür incelendiğinde, boraks ve borik asit ile emprenye ve ısıl işlemin ahşap malzemenin özellikleri üzerindeki etkisi araştırmacılar tarafından ayrı ayrı kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve tartışılmıştır. Ancak, bu işlemlerin etkilerinin bir arada ele alındığı sınırlı sayıda bilgi mevcuttur. Dolayısıyla, bu çalışmanın amacı, boraks ve borik asit çözeltileri ile emprenye ve ardından ısıl işlem uygulamasının Karaçam (*Pinus nigra* Arnold) odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemektir.

2 Materyal ve Metot

2.1 Ahşap malzeme

Bu çalışmada, ağaç işleri ve mobilya endüstrisinde yaygın olarak kullanılan karaçam (*Pinus nigra* Arnold) odunu deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Deney örnekleri, Kütahya, Simav'daki bir kereste fabrikasından rastgele yöntemle hava kurusu halinde satın alınmıştır. Odun malzemesi seçiminde, özellikle noksansız, düzgün büyümüş, budaksız, normal yetişmiş odunun (kusursuz, reaksiyon odunu içermeyen, böcek ve mantar zararları içermeyen) özelliklerine dikkat edilerek satın alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney örneklerinin hazırlanmasında aynı tomruktan kesilmiş ahşap levhalar kullanılmıştır. Taslak levhalardan eğilme direnci (ED) testleri için 360 mm × 20 mm x 20 mm (teğet x radyal ve boyuna yön) ve liflere paralel basınç direnci (BD) ve yoğunluk değerlerinin belirlenmesi için 30 mm × 20 mm x 20 mm boyutlarında çalışma metodolojisine uygun olarak hazırlanmıştır. Her bir deney grubu için on adet deney örneği hazırlanmıştır. Hazırlanan deney örnekleri, emprenye işleminden önce 20 ± 2 °C ve $\%65 \pm 3$ bağıl nem şartlarında bekletilmiş ve ardından emprenye edilmiştir. Deney örneklerine ait işlemler Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Deney örnekleri (a), pH ve yoğunluk ölçümü (b), emprenye işlemi (c), emprenyeli örnekler (d) (Doğan, 2018)

2.2 Emprenye işlemi

Bu çalışmada, emprenye maddesi olarak Boraks (Bx) ve Borik asit (Ba)'in %1, %3 ve %5 konsantrasyonlarındaki çözeltileri kullanılmıştır. Çizelge 1'de çalışmada kullanılan bor bileşiklerinin pH ve yoğunluk değerlerini verilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan bor bileşiklerinin özellikleri (Doğan, 2018)

Bor Bileşikleri	Çözücü	Konsantrasyon (%)	pH		Yoğunluk (g/ml)	
			EÖ	ES	EÖ	ES
Bx	Destile su	1	9.36	9.24	1.005	1.002
	Destile su	3	9.41	9.33	1.012	1.009
	Destile su	5	9.46	9.35	1.021	1.020
Ba	Destile su	1	6.97	9.67	1.003	1.003
	Destile su	3	5.97	5.68	1.011	1.004
	Destile su	5	5.13	5.22	1.015	1.014

Not: EÖ: Emprenye öncesi, ES: Emprenye sonrası

Emprenye işleminden önce, denge rutubete getirilmiş deney örnekleri %1, %3 ve %5 konsantrasyonlarında Bx ve Ba çözeltileri ile emprenye edilmiştir. Bu bağlamda, deney örnekleri ASTM D1413-76 (1976) standardına göre plastik bir kaptan 72 saat boyunca daldırma yöntemi kullanılarak emprenye edilmiştir (Örs ve ark., 2004). Deney örneklerinin tamamı emprenye maddesine gömülecek ve yüzeyleri birbirini kapatmayacak şekilde emprenye çözeltilerine daldırılmış ve bu şekilde sabit kalmaları için üzerlerine ağırlıklar yerleştirilmiştir. Emprenye işleminden sonra, deney örneklerinin yüzeyleri hafifçe silinerek retensiyon değerlerini belirlemek için 0,01 g hassasiyetle tartılmıştır. Her bir konsantrasyon seviyesinde, tüm deney grupları için toplam retensiyon miktarı (R), aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R = \frac{G \times C}{V} \times 10^3 \text{ g/cm}^3 \quad (1)$$

Burada; G: T2–T1 (T2: Emprenye sonrası tam kuru ağırlık, T1: Emprenye öncesi tam kuru ağırlık) (g), C: Çözelti konsantrasyonu (%), V: Numune hacmi (cm³).

2.3 Isıl işlem

Bx ve Ba çözeltileri ile emprenye edilmiş deney örneklerine 150 °C, 170 °C, 190 °C ve 210 °C sıcaklıklarda 3 saat ısıtma uygulanmıştır. Bu aşamada, her bir deney grubu ve konsantrasyon seviyesi için ayrı ayrı olacak şekilde bir ısıtma işlem fırınında (Nüve FN 120) ısıtma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra deney örneklerinin tamamı, 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve % 65 ± 3 bağıl nem şartlarında 3 hafta süreyle bekletilmiştir.

2.4 İstatistiksel analizler

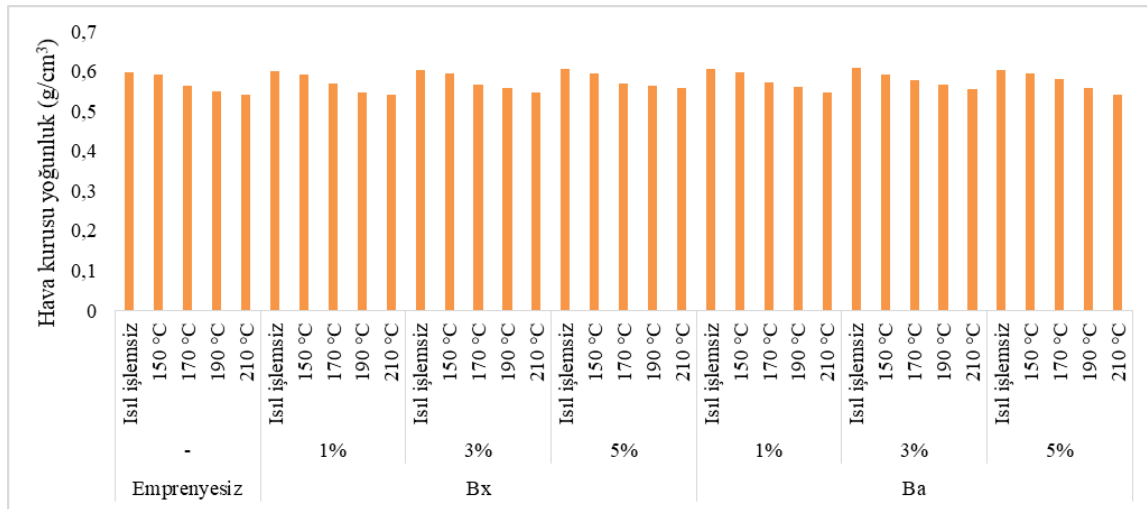
Farklı konsantrasyonlardaki (%1, %3 ve %5) Bx ve Ba çözeltileri ile emprenye edilen ve ardından ısıtma uygulanan deney örneklerinin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine ait veriler MSTAT-C yazılım paketi (Sürüm 1.42, Michigan State Üniversitesi, ABD) kullanılarak analiz edilmiştir. Grupların ortalama değerleri arasındaki farklar Duncan testi kullanılarak karşılaştırılmıştır.

3 Bulgular ve Tartışma

Bor bileşikleri ile emprenye edilen numunelerin retensiyon değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre en yüksek ortalama retensiyon değeri %5 Ba ile emprenye edilen deney örneklerinde 15.72 kg/m^3 olarak tespit edilirken, bunu %5 Bx ile emprenye edilen deney örnekleri 14.27 kg/m^3 olarak takip etmiştir. Yapılan tüm emprenye işlemlerinde bor bileşikleri konsantrasyon seviyesi arttıkça retensiyon oranının arttığı belirlenmiştir. Benzer bir çalışmada Toker (2007), boraks ve borik asit ile emprenye edilen kızılçam (*Pinus Brutia* Ten.) örneklerinin retensiyon değerini belirlemiştir. %1 borik asit konsantrasyonunda 4.78 kg/m^3 , %3 borik asitte 13.46 kg/m^3 , %5 borik asitte 27.02 kg/m^3 , %1 boraks ile 5.13 kg/m^3 , %3 boraks ile 14.83 kg/m^3 ve %5 boraks ile 24.57 kg/m^3 retensiyon oranlarının bulunduğunu bildirmiştir. Emprenye edilmiş ve ısıt işlem görmüş odun numunelerinin ortalama hava kurusu yoğunluk değerleri Şekil 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Bor bileşiklerinin ortalama retensiyon değerleri

Konsantrasyon seviyesi (%)	Retensiyon (kg/m^3)	
	Bx	Ba
1	3.44 (0.588)	2.93 (0.221)
3	9.32 (0.660)	8.61 (0.650)
5	14.27 (0.710)	15.72 (0.990)



Şekil 2. Emprenye edilmiş ve ısıt işlem uygulanmış deney örneklerinin hava kurusu yoğunluk değerleri (Doğan,2018)

Genel olarak değerlendirildiğinde uygulanan ısıt işlemin sıcaklık derecesi arttıkça, yoğunluk değerleri azalmıştır. Isıl işlemsiz örneklerle karşılaştırıldığında en az yoğunluk azalması 150 °C'de, en yüksek yoğunluk azalması ise 210 °C'de ısıt işlem uygulanan deney örneklerinde gerçekleşmiştir. Isıl işlem sonrası ahşap malzemenin yoğunluğundaki azalmanın nedenleri, ahşap malzeme bileşenlerinin (özellikle hemiselülozların) işlem sırasında buharlaşan uçucu ürünlere dönüşmesi; bazı ekstraktif maddelerin buharlaşması; ve ısıt işlem görmüş ahşabın daha az hidrofobik olması nedeniyle numunelerin daha düşük denge rutubete sahip olmasındandır (Boonstra ve ark., 2007). Yüksek sıcaklıkta ısıt işlem uygulanmış deney örneklerinin yoğunluk değerleri, düşük sıcaklıklarda ısıt işlem uygulanmış deney örneklerinden daha düşük tespit edilmiştir. Bunun nedeni hemiselülozun yüksek

sıcaklıkta daha fazla bozunmuş olmasıdır (Won ve ark., 2012). Bor bileşikleri ile emprenye edilmiş numunelerin yoğunluk değerleri, emprenye edilmemiş numunelerden biraz daha yüksektir. Ayrıca, hava kurusu yoğunluk değerlerine etkileri açısından Bx ve Ba çözeltileri arasında anlamlı bir fark yoktur. Ancak, Ba ile emprenye edilmiş numunelerin ortalama yoğunluk değerleri, Bx çözeltisi ile emprenye edilenlerden çok az daha yüksektir. Her iki emprenye çözeltisinin tüm konsantrasyon seviyelerinde emprenye edilmiş ve ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinin yoğunluk değerleri, aynı sıcaklıkta ısıtılma işlemi uygulanmış ve emprenye edilmemiş numunelerin değerlerinden daha yüksektir (%5 konsantrasyondaki Ba ile emprenye edilmiş ve 200 °C'de ısıtılma işlemi görmüş numuneler hariç). Başka bir deyişle, bor bileşikleri ile emprenye edilen deney örnekleri, emprenye edilmemiş örneklerle kıyaslandığında ısıtılma işlemi nedeniyle yoğunluk değerlerinde daha az kayıplar gerçekleşmiştir. Awoyemi ve Westermarck (2005), yüksek sıcaklıklara bağlı olarak ağaç malzemenin daha fazla bozunmasının borat emprenye edilmesiyle azaltılabileceğini bildirmiştir. Bu, alkalinin ahşabın asitliği üzerindeki tamponlama etkisinden kaynaklanıyor olabilir ve bu da ısıtılma işlemi nedeniyle ahşabın bozunma derecesini azaltmaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada, Gecer ve ark., (2015), bor bileşikleri ile ön emprenye işlemlerinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri analiz etmek için ahşap polimer kompozitler *Doğu kayınına* (*Fagus orientalis* L.) stiren ve farklı oranlardaki borik asit ve boraks emprenye edilerek hazırlanmıştır. Deney örneklerinin fırın kurusu yoğunluk değerlerinde emprenye işlemlerinden sonra önemli artışlar olduğunu, en düşük yoğunluğun ise emprenye edilmemiş deney örneklerinde tespit edildiğini bildirmişlerdir. Yangın geciktirici kimyasallara borat bazlı tamponların eklenmesinin deney örneklerinde termal bozulmayı önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir (Winandy, 1997).

Bor bileşikleri, konsantrasyon seviyesi ve ısıtılma işlemi sıcaklıklarına göre ortalama BD ve ED değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre, bor bileşiklerinin, konsantrasyon seviyesinin ve ısıtılma işlemi sıcaklıklarının deney örneklerinin BD ve ED değerleri üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır ($P \leq 0.05$). Çizelge 3'teki verilere göre, bor bileşikleri açısından en yüksek BD değeri Bx ile emprenye edilen örneklerde (47.60 N/mm^2) belirlenmiş olup, bunu sırasıyla Ba ile emprenye edilen örnekler (46.35 N/mm^2) ve emprenye edilmemiş örnekler (45.63 N/mm^2) takip etmiştir. Bu sonuçlara göre, Bx ile emprenye edilen deney örneklerinin ortalama BD değerleri, emprenye edilmeyen deney örneklerine kıyasla yaklaşık %4, Ba ile emprenye edilen örnekler göre ise %2 daha yüksektir. Konsantrasyon seviyelerine göre en yüksek BD değeri, %3 seviyesinde (47.17 N/mm^2) tespit edilirken, bunu %5 seviyesinde emprenye edilen örnekler (47.09 N/mm^2) ve %1 seviyesinde emprenye edilen örnekler (45.35 N/mm^2) izlemiştir. Isıtılma işlemi sıcaklığına göre en yüksek BD değeri 210 °C'de ısıtılma işlemi gören örneklerde (50.12 N/mm^2), bunu sırasıyla 150 °C'de ısıtılma işlemi uygulanan örnekler (47.05 N/mm^2), 170 °C'de ısıtılma işlemi uygulanan örnekler (46.62 N/mm^2), 190 °C'de ısıtılma işlemi uygulanan örnekler (45.96 N/mm^2) ve son olarak ısıtılma işlemi uygulanmayan deney örnekleri (42.87 N/mm^2) izlemiştir. Buna göre ısıtılma işlemi sıcaklığı arttıkça BD değerleri artmıştır. Benzer bir çalışmada, liflere paralel basınç direnci ısıtılma işlemi uygulamasından sonra %28, teğet yöndeki liflere paralel basınç direnci ise %8 oranında artmıştır (Boonstra ve ark., 2007).

Çizelge 3'teki sonuçlara göre, bor çözeltileri ile emprenye edilip daha sonra ısıtılma işlemi tabii tutulan test örneklerinin BD değerleri, emprenye edilmeyen deney örneklerinden biraz daha yüksektir. Ayrıca, Bx ile emprenye edilen numunelerin BD değerleri Ba'dan daha yüksektir. Ayrıca, konsantrasyon seviyesindeki artışa bağlı olarak BD değerlerinde bir miktar artış belirlenmiştir. Daha önce yapılan bir çalışmada, BD değerindeki artışın, ısıtılma işlemi görmüş

odun örneklerindeki denge nem miktarındaki azalmadan kaynaklandığı vurgulanmıştır. Böylece, ısıtma işlemi görmüş ahşabın daha az higroskopik olduğu ve maksimum bağıl su miktarı azaldığından, ısıtma işleminin direnç özelliklerine olumlu katkıda bulunabileceği ifade edilmiştir (Aytin, 2013). Başka bir çalışmada da, BD'deki artışın, ısıtma işlemi sonucu bağıl su miktarındaki azalmadan kaynaklandığı rapor edilmiştir. Buna göre ısıtma işleminden sonra amorf selülozun bozunması veya kristalleşmesi nedeniyle, yüksek derecede düzenli kristalimsi selüloz miktarı artmaktadır. Kristalimsi selüloz anizotropik bir yapı gösterdiğinden, katı ve rijit yapısı BD değerlerinde artışa neden olmaktadır (Korkut ve Kocaefe, 2009). Boonstra, (2008), yapmış olduğu çalışmada, ısıtma işleminden sonra meydana gelen liflere paralel basınç direnci değerlerindeki artışlardan, ahşap malzemenin ısıtma işleminden sonra daha az higroskopik olması, buna bağlı olarak bağıl su miktarının azalması, amorf selülozun kristalleşmesi ile kristal selüloz miktarının artması ve lignin polimer ağının çapraz bağlanmasındaki artış sorumlu tutulmuştur.

Çizelge 3. Bor bileşikler, konsantrasyon seviyesi ve ısıtma işlem sıcaklığının liflere paralel basınç ve eğilme dirençleri üzerine Duncan testi sonuçları (Doğan, 2018)

İşlemler	Faktörler	BD (N/mm ²)	ED (N/mm ²)
Bor bileşikler	Emprenyesiz	45.63 ^B	78.26 ^C
	Bx	47.60 ^A	79.43 ^B
	Ba	46.35 ^{AB}	80.88 ^A
Konsantrasyon	1%	45.35 ^B	74.89 ^C
	3%	47.17 ^A	82.13 ^A
	5%	47.09 ^A	81.54 ^B
Isıtma işlemi	Isıtma işlemsiz	42.87 ^C	77.32 ^C
	150 °C	47.05 ^B	91.48 ^A
	170 °C	46.62 ^B	82.71 ^B
	190 °C	45.96 ^B	75.93 ^D
	210 °C	50.12 ^A	70.17 ^E

Not: Üst simge Duncan testine göre homojenlik grubu (farklı harfler anlamlı bir farkı gösterir, $P \leq 0.05$).

Bu sonuçlara göre, benzer şekilde, bor bileşikler ile emprenye edilen deney örneklerinin ED değerleri, emprenye edilmemiş numunelerden daha yüksektir (Çizelge 3). En yüksek ED değeri Ba ile emprenye edilmiş test deney örneklerinde (80.88 N/mm²) tespit edilirken, bunu Bx ile emprenye edilen örnekler (79.43 N/mm²) ve emprenye edilmeyen örnekler (78.26 N/mm²) takip etmiştir. Buna göre Ba ile emprenye edilen örneklerin ED değerleri, emprenyesiz örneklerle göre yaklaşık %3, Bx ile emprenye edilen örneklerle göre ise yaklaşık %2 oranında daha yüksektir. Konsantrasyon seviyesine göre en yüksek ED değeri %3'de emprenye edilen deney örneklerinde (82.13 N/mm²) tespit edilirken, bunu %5'de emprenye edilen deney örnekleri (81.54 N/mm²) ve %1'de emprenye edilen deney örnekleri (74.98 N/mm²) izlemiştir. Diğer yandan ED değerleri de ısıtma işlem sıcaklığının artışından etkilenmiştir. Isıtma işlemi uygulanmış deney örneklerinin ED değerleri, ısıtma işlemi uygulanmayan örneklerle kıyaslandığında düşük sıcaklıklarda (150 °C, 170 °C) artarken, yüksek sıcaklıklarda (190 °C, 210 °C) azalmıştır. Literatürde benzer bir çalışmada, Sitka ladini (*Picea sitchensis* Carr.) ağacına uygulanan ısıtma işleminin başlangıç aşamalarında ED değerlerinin bir miktar arttığı, ilerleyen süreçlerde azaldığı belirlenmiştir (Kubojima ve ark, 2000). Başka bir çalışmada ise bambu örnekler 130 °C'de ısıtma işleme tabi tutulmuş ve eğilme direncinde meydana gelen değişimler analiz edilmiştir. Sonuç olarak ısıtma işlem basıncının artmasıyla

birlikte, bambunun eğilme direncinin başlangıçta arttığı daha sonra azaldığı belirlenmiştir (Li ve ark., 2023). Yüksek sıcaklıklarda mekanik dirençlerdeki azalmalar, genellikle ahşap polimerlerinin depolimerizasyon reaksiyonları (Kotilainen, 2000) ve hücre duvarı bileşenlerinin parçalanması (Yıldız ve ark., 2006) ile açıklanabilirken, ısıtılma işleminden sonra görülen direnç artışları genellikle selüloz kristalinitesindeki artışa ve çapraz bağlanma reaksiyonlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca çam ağacında düşük sıcaklıktaki ısıtılma işlemi eğilme direncinde artışlara neden olurken, 200 °C'nin üzerindeki ısıtılma işlem uygulamalarında önemli direnç kayıpları yaşanmaktadır (ThermoWood Handbook, 2003). Tüm deney gruplarında emprenye işleminin ve ardından uygulanan ısıtılma işleminin BD ve ED değerleri üzerine etkisini belirlemek için yapılan Duncan testi sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Farklı sıcaklıklarda uygulanan ısıtılma işlemi ile farklı konsantrasyon seviyelerinde bor bileşikleriyle emprenye işleminin kombinasyonu, deney numunelerinin BD ve ED özellikleri üzerinde farklı etkilere neden olmuştur (Çizelge 4). Çizelge 4 ayrıca, emprenye ve ısıtılma işleminin BD ve ED değerleri üzerinde düzenli ve istikrarlı bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Bunlara göre, BD özelliklerine ilişkin olarak en yüksek %3 oranında Bx çözeltisi ile emprenye edilmiş ve 210 °C'de ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinde (53.46 N/mm²), en düşük ise %1 konsantrasyondaki Ba çözeltisi ile emprenye edilmiş ve ısıtılma işlemi uygulanmayan deney örneklerinde (39.10 N/mm²) tespit edilmiştir. Bu verilere göre, sadece emprenye edilmiş tüm deney örneklerinin BD değerleri, emprenye edilmemiş deney örneklerinkinden düşük olduğu tespit edilmiştir. Mevcut çalışmada, sadece bor bileşikleriyle emprenye işlemi BD'yi olumsuz etkilemiş ve direnç özelliklerinde azalmaya neden olmuştur. Çizelge 4'te ED özellikleri açısından, en yüksek değer %5 konsantrasyondaki Bx ile emprenye edilen ve 150 °C'de ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinde (103.66 N/mm²), en düşük ise %1 konsantrasyondaki Ba ile emprenye edilen ve 210 °C'de ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinde (61.32 N/mm²) elde edilmiştir. Çizelge 3 ve Çizelge 4'teki bulgulara göre, ısıtılma işleminden önce deney örneklerinin bor bileşikleriyle emprenye edilmesi, ısıtılma işleminden kaynaklanan ED ve BD özelliklerindeki direnç kayıplarını hafiflettiği görülmektedir.

Can ve ark., (2010), %4 konsantrasyon seviyesinde boraks (Bx) ve borik asit (Ba) çözeltileriyle emprenye edilmiş ladin (*Picea orientalis* Link.) ve çam (*Pinus nigra* subsp.) deney örneklerini 212 °C'de 2 saat ısıtılma işlemi uygulandıktan sonra eğilme (ED) ve liflere paralel basınç (BD) dirençlerindeki değişimleri analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, Bx emdirilmiş ısıtılma işlemi uygulanmış çam örneklerinin BD değerlerinde %9'luk bir artış olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca aynı çalışmada, Ba ile emprenye edilen ve ısıtılma işlemi uygulanmış ladin örneklerinin ED değerlerinde %17, Bx ile emprenye edilmiş ve ısıtılma işlemi uygulanmış çam örneklerinin ED değerlerinde ise %14'lük bir artış olduğu rapor edilmiştir. Başka bir çalışmada, Awoyemi ve Westermarck (2005), sodyum borat ile emprenye edilmiş ve 180 °C ve 200 °C'de 2 ve 4 saat boyunca ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinin ısıtılma sırasında mekanik direnç kaybının şiddetinde bazı azalmalarla sonuçlandığı bildirilmiştir. Çalışmada bu durumun alkalinin ahşabın asitliği üzerindeki tamponlama etkisinden kaynaklandığını ve bununla ahşap malzemenin bozunma derecesini azaltabileceğini öne sürmüşlerdir. Ayrıca, uygulanan ısıtılma işlemi koşullarına bağlı olarak, ısıtılma işlemi uygulanmış ahşabın direnç özellikleri üzerinde ön işlem olarak borat emdirilmesinin olumlu etkilerini bildirmişlerdir. Doğan ve ark., (2021) tarafından yürütülen başka bir çalışmada, karaçam (*Pinus nigra* Arnold) deney örnekleri %1, %3 ve %5 konsantrasyon seviyelerinde diamonyum fosfat (DAP) ve sodyum karbonat (SC) bileşikleriyle emprenye edilmiş ve daha sonra farklı sıcaklıklarda ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak, ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinin liflere paralel basınç direnci (BD) ve eğilme direnci (ED) değerlerinde önemli kayıplar yaşandığı, ısıtılma işleminden

önce uygulanan emprenye işlemi bu direnç kayıplarını sınırlandırdığı bildirilmiştir. Tomak ve ark., (2011), bor emdirmeye işleminden sonra uygulanan yağda ısıtma işleminin deney örneklerinin liflere paralel basınç direnci üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmadığını, aksine tarımsal bor ürünü (TB) ve yağda ısıtma işlemlerinin kontrol grubuyla karşılaştırıldığında ED'yi artırdığını bildirmişlerdir.

Çizelge 4. BD ve ED değerleri için Duncan testi sonuçları (Doğan, 2018)

Bor Bileşikleri	Konsantrasyon	Isıl İşlem	BD (N/mm ²)	ED (N/mm ²)
Emprenyesiz	-	Isıl işlemsiz	44.75 ^{FGHI}	72.39 ^{GHIJK}
		150 °C	45.72 ^{EFGH}	95.75 ^{ABC}
		170 °C	46.31 ^{EFGH}	86.27 ^{BCDEFG}
		190 °C	42.65 ^{HIJ}	74.30 ^{FGHIJK}
		210 °C	48.71 ^{ABCDEF}	62.59 ^{JK}
	1%	Isıl işlemsiz	39.10 ^J	70.06 ^{HIJK}
		150 °C	44.72 ^{FGHI}	82.26 ^{CDEFGHI}
		170 °C	42.75 ^{HIJ}	76.08 ^{EFGHIJ}
		190 °C	45.63 ^{EFGH}	71.78 ^{GHIJK}
		210 °C	51.25 ^{ABCD}	61.32 ^K
Ba	3%	Isıl işlemsiz	42.39 ^{HIJ}	84.83 ^{BCDEFGH}
		150 °C	49.51 ^{ABCDEF}	98.11 ^{AB}
		170 °C	49.12 ^{ABCDEF}	84.37 ^{BCDEFGH}
		190 °C	49.96 ^{ABCDE}	79.24 ^{DEFGHI}
		210 °C	53.27 ^{AB}	75.02 ^{EFGHIJK}
	5%	Isıl işlemsiz	44.65 ^{FGHI}	82.27 ^{CDEFGHI}
		150 °C	48.89 ^{ABCDEF}	93.24 ^{ABCD}
		170 °C	49.36 ^{ABCDEF}	82.82 ^{CDEFGHI}
		190 °C	52.13 ^{ABC}	75.56 ^{EFGHIJK}
		210 °C	52.21 ^{ABC}	74.45 ^{FGHIJK}
Bx	1%	Isıl işlemsiz	43.22 ^{GHIJ}	79.29 ^{DEFGHI}
		150 °C	44.79 ^{FGHI}	74.21 ^{FGHIJK}
		170 °C	46.10 ^{EFGH}	70.67 ^{HIJK}
		190 °C	46.15 ^{EFGH}	71.20 ^{HIJK}
		210 °C	48.45 ^{BCDEF}	75.22 ^{EFGHIJK}
	3%	Isıl işlemsiz	40.16 ^{IJ}	77.67 ^{EFGHI}
		150 °C	49.50 ^{ABCDEF}	89.15 ^{ABCDE}
		170 °C	46.62 ^{DEFGH}	93.66 ^{ABCD}
		190 °C	45.64 ^{EFGH}	88.02 ^{BCDEF}
		210 °C	53.46 ^A	70.62 ^{HIJK}
	5%	Isıl işlemsiz	42.02 ^{HIJ}	82.81 ^{CDEFGHI}
		150 °C	48.87 ^{ABCDEF}	103.66 ^A
		170 °C	47.74 ^{CDEFG}	77.98 ^{EFGHI}
		190 °C	46.19 ^{EFGH}	74.69 ^{EFGHIJK}
		210 °C	46.06 ^{EFGH}	87.16 ^{BCDEF}

4 Sonuç ve Öneriler

Boraks ve borik asit çözeltilerinin farklı konsantrasyonları (%1, %3 ve %5) ile emprenye edildikten sonra 150 °C, 170 °C, 190 °C ve 210 °C'de 3 saat boyunca uygulanan ısıtma işleminin, karaçamın (*Pinus nigra* Arnold) hava kurusu yoğunluk, liflere paralel basınç direnci (BD) ve eğilme direnci (ED) değerleri üzerindeki birleşik etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar;

- Deney örneklerine emprenye ve ısıtma işlem uygulamalarının hava kurusu yoğunluk, BD ve ED özelliklerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir.
- Her bir bor bileşiğinin, konsantrasyon seviyesinin ve ısıtma işlem sıcaklığının BD ve ED yoğunluk değerleri üzerindeki etkisi değişkendir.
- Yüksek sıcaklıklarda uygulanan ısıtma işlem, deney örneklerinin hava kurusu yoğunluk değerlerinin azalmasında etkili olmuştur. Hava kurusu yoğunluk değerleri, artan ısıtma işlem sıcaklığından olumsuz etkilenmiş ve en yüksek değişim, 210 °C'de ısıtma işlem uygulanan deney örneklerinde tespit edilmiştir.
- Genel olarak emprenye işlemi, konsantrasyon seviyesindeki artış ve ısıtma işlem BD'nin artmasına neden olmuştur.
- Bor bileşikleriyle emprenye ve ardından ısıtma işlem uygulaması sonucunda deney örneklerinin BD ve ED özellikleri, ısıtma işlem koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir.
- Bor bileşikleriyle emprenye edilmiş deney örneklerinin ortalama ED değerleri, emprenye edilmeyenlere kıyasla göre daha yüksektir.
- ısıtma işlem görmüş deney örneklerinin ED değerleri düşük sıcaklıklarda artarken, yüksek sıcaklıklarda belirgin bir şekilde azalmıştır.
- ısıtma işlem uygulamalarından sonra meydana gelen mekanik direnç kayıplarının azaltılmasında, ön işlem olarak bor bileşikleriyle emprenye edilme yalnızca hafif ısıtma işlem koşullarında önerilebilir. Ayrıca bundan sonraki yapılacak çalışmalarda farklı emprenye çözeltilerin, ısıtma işlem uygulamalarından önce farklı ağaç türlerinde kullanılarak mekanik dirençlerdeki kayıpların azaltılmasına yönelik çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalında Bilal Doğan tarafından hazırlanan “Boraks ve Borik Asit İle Emprenye Edilmiş ve ısıtma İşlem Görmüş Karaçam Odununun Bazı Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri” isimli yüksek lisans tezi esas alınarak üretilmiştir.

Yazar Katkıları

Bilal Doğan: Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), proje yönetimi, metodolojinin belirlenmesi, araştırmanın yapılması, analizlerin yapılması, veri iyileştirme, kaynaklar, görselleştirme, makale taslak oluşturma, makale yazma, inceleme ve düzenleme. **Osman Perçin:** Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), proje yönetimi, metodolojinin belirlenmesi, veri iyileştirme, kaynaklar, denetleme, doğrulama, makale yazma, inceleme ve düzenleme.

Finansal destek beyanı

Finansal destek alınmamıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- ASTM D1413-76 (1976). Standard test method of testing wood preservatives by laboratory soilblock cultures, Annual Book of ASTM Standard.
- Aşçı, T., and Keskin, H., (2021). Strengthening the retention amount and leaching resistance of boron compounds used as impregnation material, *Journal of Polytechnic*, 24 (1), 103-112, DOI: [10.2339/politeknik.687698](https://doi.org/10.2339/politeknik.687698)
- Aşçı, T., (2016). *Modification of performance features of boron compounds used as impregnation material*. Ph.D. Thesis, Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Türkiye.
- Awoyemi, L., and Westermarck, U., (2005). Effects of borate impregnation on the response of wood strength to heat treatment, *Wood Science and Technology*, (2005) 39, 484–491, DOI: [10.1007/s00226-005-0001-5](https://doi.org/10.1007/s00226-005-0001-5)
- Awoyemi, L.,(2008). Determination of optimum borate concentration for alleviating strength loss during heat treatment of wood, *Wood Science and Technology*, 42, 39–45, DOI: [10.1007/s00226-007-0139-4](https://doi.org/10.1007/s00226-007-0139-4)
- Ayata, Ü., (2024). The effects of carbonate and vinegar mixture on selected surface properties of iatandza (*Albizia ferruginea*) wood, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 7(1), 17-25, DOI: [10.33725/mamad.1457494](https://doi.org/10.33725/mamad.1457494)
- Aytin, A., (2013). *Yabani kiraz (Cerasus avium (L.) monench) odununun fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri üzerine yüksek sıcaklık uygulamasının etkisi*, Doktora tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye.
- Bal, B. C., (2006). *Amonyaklı bakır quat (ACQ) emprenye tuzu ile emprenye edilen sarıçam (Pinus sylvestris L.) odununun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Bal, B.C., Altuntaş E., and Narlıoğlu N., (2023), Some selected properties of composite material produced from plastic furniture waste and wood flour, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 6(2), 233-244, DOI:[10.33725/mamad.1384214](https://doi.org/10.33725/mamad.1384214)
- Bari, E., Jamali, A., Nazarnezhad, N., Nicholas, D. D., Humar, M., and Najafian, M., (2019). An innovative method for the chemical modification of *Carpinus betulus* wood: A methodology and approach study, *Holzforschung*, 73(9), 839-846, DOI: [10.1515/hf-2018-0242](https://doi.org/10.1515/hf-2018-0242)
- Baysal E., (2003). Fire features of Scots pine wood impregnated with boron compounds and natural tanning materials, *Erciyes University, Journal of Applied Science Institute*, 19 (1-2), 59-69.
- Boonstra M. J., (2008). *A two-stage thermal modification of wood*, Ph.D. dissertation in cosupervision, Ghent University and Université Henry Poincaré, Nancy-Fransa.
- Boonstra, M. J., Van Acker, J., Tjeerdsma, B. F., and Kegel, E. V., (2007). Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents, *Annals of Forest Science*, 64(7), 679-690, DOI: [10.1051/forest:2007048](https://doi.org/10.1051/forest:2007048)

- Can, A., Yildiz, S., Yildiz, U. C., and Tomak, E. D., (2010). Effects of boron impregnation and heat treatment on some physical and mechanical properties of spruce and pine wood. In: The 1st International Symposium on Turkish Japanese Environment and Forestry, Trabzon, Turkey, pp. 753-766.
- Çavdar, A. D., Mengeloğlu, F., and Karakus, K., (2015). Effect of boric acid and borax on mechanical, fire and thermal properties of wood flour filled high density polyethylene composites, *Measurement*, 60, 6-12, DOI: [10.1016/j.measurement.2014.09.078](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.078)
- Dauvergne, E.T., Soulounganga, P., Gerardin, P., and Loubinoux, B., (2000). Glycerol/glyoxal: A new boron fixation system for wood preservation and dimensional stabilization, *Holzforschung*, 54, 123-126, DOI: [10.1515/HF.2000.021](https://doi.org/10.1515/HF.2000.021)
- Doğan, B. (2018). *Boraks ve borik asit ile emprenye edilmiş ve ısıtma işlemi görmüş karaçam odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri*, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, Türkiye.
- Doğan, B., Percin, O., and Sofuoğlu, S. D., (2021). Effects of impregnation and heat treatment on density, bending and compression properties of black pine (*Pinus nigra* Arnold) wood, *Wood Material Science & Engineering*, 17(6), 887-894, DOI: [10.1080/17480272.2021.1969685](https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1969685)
- Esteves, B. M., and Pereira, H. M., (2009). Wood modification by heat treatment: A review, *BioResources*, 4(1), 370-404, DOI: [10.15376/biores.4.1.370-404](https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404)
- Fengel, D., and Wegener, G., *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 613 pp. 1984.
- ThermoWood Handbook (2003). Finnish Thermowood Association, Helsinki, Finland. https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf (Accessed February 22, 2025).
- Gecer, M., Baysal, E., Toker, H., Turkoglu, T., Vargun, E., and Yuksel, M., (2015). The effect of boron compounds impregnation on physical and mechanical properties of wood polymer composites, *Wood Research*, 60(5), 723-738.
- Hill, C.A.S., *Wood modification: chemical, thermal and other processes*, John Wiley & Sons Ltd: West Sussex, England, 2006.
- Johansson, D., (2008). *Heat treatment of solid wood, effects on absorption, strength and colour*, Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, LTU Skellefteå, Division of Wood Physics 2008;53, ISSN: 1402-544.
- Jones, D., and Sandberg, D., (2020). A review of wood modification globally–updated findings from COST FP1407, *Interdisciplinary Perspectives on the Built Environment*, 1-31, DOI: [10.37947/ipbe.2020.vol1.1](https://doi.org/10.37947/ipbe.2020.vol1.1)
- Kartal, S. N., and Imamura Y., (2004). Effects of N'-N-(1, 8-Naphthalyl) hydroxylamine (NHA-Na) and hydroxynaphthalimide (NHA-H) on boron leachability and biological degradation of wood, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 62(5), 378-386, DOI: [10.1007/s00107-004-0500-3](https://doi.org/10.1007/s00107-004-0500-3)
- Kartal, S. N., Hwang, W. J., and Imamura, Y., (2008). Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: Chemical and strength properties of

- wood, *Journal of materials processing technology*, 198(1-3), 234-240, DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2007.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.07.001)
- Kartal, S.N., Green, F., and Clausen, C.A., (2009). Do the unique properties of nanometals affect leachability or efficacy against fungi and termites? *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(4), 490-495, DOI: [10.1016/j.ibiod.2009.01.007](https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.01.007)
- Keskin, H., Atar, M., and İzçiler, M., (2009). Impacts of impregnation chemicals on combustion properties of the laminated wood materials produced combination of beech and poplar veneers, *Construction and Building Materials*, 23(2), 634-643, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2008.02.006](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.006)
- Korkut, S., and Kocaefe, D., (2009). Effect of heat treatment on wood properties, *Düzce University Journal of Forestry*, 5(2), 11-34
- Kotilainen, R., (2000). *Chemical changes in wood during heating at 150–260 °C*. Ph.D. Thesis, Jyväskylä University, Research report 80, Finland.
- Kubojima, Y., Okano, T., and Ohta, M., (2000). Bending strength and toughness of heat-treated wood, *Journal of Wood Science*, 46, 8-15
- LeVan, S. L. and Winandy, J. E., (1990). Effects of fire retardant treatments on wood strength: A review, *Wood and Fiber Science*, 22(1), 113-131.
- Li, D., Yang, S., Liu, Z., Wang, Z., Ji, N., and Liu, J., (2023). Effects of heat treatment under different pressures on the properties of bamboo, *Polymers*, 15(14), 3074, 1-12, DOI: [10.3390/polym15143074](https://doi.org/10.3390/polym15143074)
- Liao, J., and Mubarak, M., (2024). Revolutionizing wood: cutting-edge modifications, functional wood-based composites, and innovative applications in wood industry—impacts and benefits, Edited by Zhou, X., IntechOpen, London, UK (2024).
- Örs, Y., Atar, M. and Keskin, H., (2004) Bonding strength of some adhesives in wood materials impregnated with Imersol-Aqua, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 24, 287–294, DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2003.10.007](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2003.10.007)
- Özçifçi, A., Altun, S., and Yapıcı, F., (2009). Effects of heat treatment on technological properties of wood, In 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09) Karabük. Türkiye, May 13-15.
- Sandberg, D., Kutnar, A., and Mantanis, G., (2017). Wood modification technologies-a review, *Iforest-Biogeosciences and Forestry*, 10(6), 895-908, DOI: [10.3832/ifor2380-010](https://doi.org/10.3832/ifor2380-010)
- Sevim Korkut, D., and Hızıroğlu, S., (2014). Experimental test of heat treatment effect on physical properties of red oak (*Quercus falcate* Michx.) and southern pine (*Pinus taeda* L.), *Materials*, 7(11), 7314-7323, DOI: [10.3390/ma7117314](https://doi.org/10.3390/ma7117314)
- Şen, S., and Hafizoğlu, H., (2001). The effects on the environment of some chemicals used in wood protection, National Industry – Environment Symposium and Gallery, Mersin, 25-27 April 2001, 753-758.
- Şimşek Türker, Y., Kılınçarslan, Ş., and Işıldar, N., (2024). Numerical and experimental behavior of fiber reinforced polymer type and layer number effect on the flexural properties of heat-treated black pine wood, *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 21(2), 279-289, DOI: [10.1007/s13196-024-00347-0](https://doi.org/10.1007/s13196-024-00347-0)

- Toker, H., (2007). *Borlu bileşiklerin ağaç malzemenin bazı fiziksel mekanik ve biyolojik özelliklerine etkilerinin belirlenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye
- Tomak, E. D., Viitanen, H., Yıldız, U. C., and Hughes, M., (2011). The combined effects of boron and oil heat treatment on the properties of beech and Scots pine wood. Part 2: Water absorption, compression strength, color changes, and decay resistance, *Journal of Materials Science*, 46(3), 608-615, DOI: [10.1007/s10853-010-4860-2](https://doi.org/10.1007/s10853-010-4860-2)
- Winandy, J. E., (1997). Effects of fire retardant retention, borate buffers, and redrying temperature after treatment on thermal-induced degradation, *Forest Products Journal*, 47(6), 79-86
- Won, K. R., Kim, T. H., Hwang, K. K., Chong, S. H., Hong, N. E., and Byeon, H. S., (2012). Effect of heat treatment on the bending strength and hardness of wood, *Journal of the Korean Wood Science and Tech.*, 40(5), 303-310, DOI: [10.5658/WOOD.2012.40.5.303](https://doi.org/10.5658/WOOD.2012.40.5.303)
- Yıldız, S., Gezer, E.D., and Yıldız, U. C., (2006). Mechanical and chemical behaviour of spruce wood modified by heat, *Building and Environment*, 41(12), 1762-1766, DOI: [10.1016/j.buildenv.2005.07.017](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.017)
- Zelinka, S. L., Altgen, M., Emmerich, L., Guigo, N., Keplinger, T., Kymäläinen, M., Thybring, E. E., and Thygesen, L. G., (2022). Review of wood modification and wood functionalization Technologies, *Forests*, 13(7), 1004, 1-46, DOI: [10.3390/f13071004](https://doi.org/10.3390/f13071004)
- Zhang, J. W., Liu, H. H., Yang, L., Han, T. Q., and Yin, Q., (2020). Effect of moderate temperature thermal modification combined with wax impregnation on wood properties, *Applied Sciences*, 10(22), 8231, 1-12, DOI: [10.3390/app10228231](https://doi.org/10.3390/app10228231)



Evaluation of the wood machining characteristics and performance of *Melia azedarach* L. for furniture

Alvin F. Vardeleon¹ , Juanito P. Jimenez, Jr.*¹ , Oswald David F. Ilagan¹ ,
Edward Paul S. Marasigan¹ 

ABSTRACT: The Philippine wood industry requires sustainable, indigenous alternatives to supplement limited commercial exotic species. This study evaluated the potential of *Melia azedarach* L. focusing on its machining characteristics and structural performance for high-value furniture manufacturing. Machining tests (ASTM D-1666-22) revealed the species has generally "Good" to "Excellent" workability across planing, turning, boring, shaping, and mortising. Optimal planing quality (98.80% defect-free area) was achieved using 25° and 30° knife hook angles, while boring quality was significantly enhanced by faster spindle speeds (2300 and 3900 rpm). Minimal defects such as chip marks, fuzzy grain, and torn grain were observed. For structural suitability, two prototype armchairs with mortise-tenon and dowel joint systems were subjected to rigorous strength and durability evaluation using ISO 7173:1989 test level 3. Both prototypes successfully passed all static, fatigue, and impact requirements without failure. The findings confirm that *M. azedarach* possesses favorable processing qualities and sufficient structural integrity, making it a viable and sustainable substitute material for durable furniture and high-value woodwork.

Keywords: *Melia azedarach*, Wood machining, Jointing system, Furniture testing

Melia azedarach L. odununun mobilya üretimi için ahşap işleme özelliklerinin ve performansının değerlendirilmesi

ÖZ: Filipin ahşap endüstrisi, sınırlı sayıda ticari egzotik türün yerini dolduracak sürdürülebilir, yerli alternatiflere ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışma, *Melia azedarach* L.'nin potansiyelini, yüksek değerli mobilya üretimi için işleme özelliklerine ve yapısal performansına odaklanarak değerlendirmiştir. İşleme testleri (ASTM D-1666-22), türün planyalama, tornalama, delme, şekillendirme ve oyma işlemlerinde genel olarak "İyi" ile "Mükemmel" işlenebilirliğe sahip olduğunu ortaya koymuştur. 25° ve 30° bıçak kama açıları kullanılarak optimum planyalama kalitesi (%98.80 kusursuz alan) elde edilirken, delme kalitesi daha hızlı mil hızlarıyla (2300 ve 3900 dev/dak) önemli ölçüde artırılmıştır. Talaş izleri, puslu damarlar ve yırtık damarlar gibi minimum kusurlar gözlemlenmiştir. Yapısal uygunluk açısından, zıvana ve dübel birleştirme sistemleri kullanan iki prototip koltuk, ISO 7173:1989 seviye 3 test standardı kullanılarak mukavemet ve dayanıklılık değerlendirmesine tabi tutulmuştur. Her iki prototip de tüm statik, yorulma ve darbe gerekliliklerini hatasız bir şekilde başarıyla geçti. Elde edilen bulgular; *M. Azedarach* odununun uygun işleme özelliklerine ve yeterli yapısal bütünlüğe sahip olduğunu ve bu sayede dayanıklı mobilya ve yüksek değerli ahşap işçiliği için uygulanabilir ve sürdürülebilir bir alternatif malzeme olduğunu doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: *Melia azedarach*, Ahşap işleme, Birleştirme sistemi, Mobilya testi

1 Introduction

The Philippine wood industry faces two persistent challenges: the rising demand for high-quality timber and the need to conserve the remaining natural forests. Following the implementation of Executive Order No. 23, which banned logging in natural forests, the country's wood supply shifted heavily toward plantation-grown exotic species such as *Falcataria moluccana*, *Gmelina arborea*, *Acacia mangium*, and *Swietenia macrophylla* (DENR-FMB, 2023). These industrial tree plantation species (ITPS) dominate the veneer, plywood and lumber supply chain due to their rapid growth and short rotation cycles of 3–8 years for *F. moluccana* and *G. arborea* (Jimenez et al., 2015; Alipon et al., 2021; Jimenez et al., 2021) and 10 - 20 years for *A. mangium* and *S. macrophylla* (Alipon et al., 2017; Marasigan et al., 2025), with some stands reaching the minimum 30 cm cutting diameter earlier when derived from plus-tree selections (Jimenez et al., 2022).

However, the heavy reliance on exotic plantations under the National Greening Program (NGP) has raised ecological concerns (Aguilos et al., 2020). Several introduced species exhibit invasive tendencies, modify soil chemistry, and suppress native vegetation regeneration (Tulod et al., 2017). Their widespread cultivation has also been associated with increased pest and disease incidence in both plantation-grown and native forest species (Joshi, 2006; Pinol et al., 2017). These trade-offs highlight the need to diversify the country's plantation portfolio with native species that are both ecologically compatible and industrially viable.

In response, the Forest Products Research and Development Institute (FPRDI) and partner institutions have begun promoting indigenous species for commercial wood processing. *Melia azedarach* L., locally known as paraiso or bagalunga, is one of the most promising candidates. Due to its fast-growing characteristics, straight grain, pinkish-brown aesthetic color, ease of drying, and good finishing quality, which are comparable to *S. macrophylla* and *G. arborea*, it has been considered as an alternative material in small-scale furniture production (Fern, 2014; Natividad, 2016; Marasigan and Munding 2024).

Recent local studies by FPRDI researchers (Marasigan and Munding 2024; Marasigan et al., 2025) reported that planted *M. azedarach* exhibits basic relative density and mechanical strength comparable to widely used commercial exotic timbers such as *G. arborea*, *S. macrophylla*, but superior to *F. moluccana*. These findings implied its potential as a raw material for value-added processing. Yet, while basic physical and mechanical properties are already documented, little is known about its machinability and product performance, which are critical parameters that determine suitability for high-value furniture manufacture.

There is a need to assess how *M. azedarach* responds under standardized machining conditions with the increasing adoption of computer-aided precision cutting, shaping, and jointing technologies in the furniture sector. ASTM D1666 (2022) provides a standardized protocol for evaluating machining performance through planing, routing, turning, boring, mortising, and sanding operations. These performance-based evaluations, complemented by joint strength assessment, offer a more realistic basis for industrial recommendations than basic property data alone.

This study aims to generate relevant technical information on the processing characteristics of *M. azedarach* as a raw material for solid wood furniture manufacturing. Specifically, it seeks to: (1) evaluate the machining characteristics of *M. azedarach* using ASTM D1666 standards, and (2) assess its suitability for furniture application by determining the structural performance of joints, focusing on mortise-tenon and dowel joint systems.

2 Materials and Methods

2.1 Log collection, sawmilling, and lumber drying

Log samples of *M. azedarach* were collected from Quezon Province, Philippines. A total of 35 logs were sourced from 12 sample trees. Sawmilling was conducted at the FPRDI Sawmill Laboratory using a mobile horizontal bandsaw mill (Wood-Mizer LT 28). Each log was sawn into 25 mm and 50 mm thick boards using either the conventional sawing-around method or the live-sawing pattern.

The sawn lumber was kiln-dried using the FPRDI Furnace-Type Dryer (FTD), a multifunctional wood-fired manually operated drying system suitable for wood, bamboo, and non-timber materials (Carmelo, 2005; Jimenez, 2023). Temperature regulation was achieved by adjusting the amount of wood fuel and manipulating the vent openings. Relative humidity (RH) was controlled by regulating the water spray line and vent operation. Dry-bulb and wet-bulb temperatures were manually monitored by the kiln operator. The final moisture content (MC) of the lumber after kiln drying ranged from 9–12%.

2.2 Wood machining evaluation

The machining evaluation followed the ASTM D1666-22 standard test method for wood and wood-based materials. Table 1 presents the machining tests and experimental design used to assess the machining characteristics of *M. azedarach*. Machining parameters were varied only for planing, turning, and boring while mortising and shaping were conducted at constant settings.

Kiln-dried and defect-free lumber specimens were randomly selected and conditioned before machining assessment. For the shaping test, one edge of each sample was pre-rounded using a band saw before the machining evaluation.

Table 1. Machining tests and experimental parameters used for *M. azedarach*

Machining Test	Specimen Dimensions (mm)	No. of Replicates	Experimental Variable	Equipment Parameters
Planing	19×76×300	10	Knife Cutting Angle	20°, 25°, 30°
Turning	19×19×152	10	Spindle Speed (rpm)	1150, 2050, 4025
Boring*	19×76×300	10	Spindle Speed (rpm)	1300, 2300, 3900
Mortising	19×76×300	30	Constant Spindle Speed	3440 rpm
Shaping	19×76×300	30	Constant Spindle Speed	7000 rpm

Note: Each equipment parameter has 10 replicates for planing, turning and boring. * The 30 bored samples were also used for mortising, and shaping evaluation.

2.2.1 Planing Test

The planing test was performed using a single-surface planer equipped with a four-knife cutterhead operating at 4000 revolutions per minute (rpm). Three sets of newly ground knives with cutting angles of 20°, 25°, and 30° were used. All cuts were made at a constant depth of 1.6 mm, and a consistent feed rate of 2.25 m/min to 3.0 m/min. Dummy boards were run before testing each knife set on the actual samples. The direction of feed and the planed surface were marked on the specimens after each pass to ensure uniform observation.

2.2.2 Turning test

Turning was performed using a multi-speed wood lathe machine fitted with a pattern knife mounted on a compound sliding rest. The knife was positioned to produce a cylindrical specimen with a minimum diameter of 9.72 mm. The influence of three spindle speeds (1150, 2050, and 4025 rpm) on surface finish quality was assessed.

2.2.3 Boring test

The boring test was done using an electric-driven vertical drill press fitted with a 25 mm diameter single-twist, solid-center, brad-point spur drill bit. Two holes were bored through each specimen using a clamped jig to ensure consistent alignment. Specimens were bored at spindle speeds of 1300, 2300, and 3900 rpm.

2.2.4 Mortising test

Mortising was conducted at a constant spindle speed of 3440 rpm using an electric-driven mortising machine equipped with a sharp 12 mm hollow chisel mortiser. Two mortises were cut into each specimen. The specimens were clamped firmly against a backboard to minimize splintering at the exit point of the chisel and bit.

2.2.5 Shaping test

A single-spindle shaper operating at 7000 rpm was used for shaping. Two sharp, quarter-round profile knives were installed. A jig was employed to securely hold the specimens during cutting on both the end-grain and side-grain surfaces.

2.2.6 Evaluation of surface quality

After each machining operation, the surface quality of the specimens was visually inspected for machining defects, including torn grain, raised grain, roughness, and fuzzy grain. Evaluation followed the five-grade rating system based on the percentage of defect-free surface area as specified in ASTM D1666-22 (Table 2).

Table 2. Rating system for machining test

Grade	Rating	% Defect-Free-Area
1	Excellent	95-100
2	Good	85-94
3	Fair	75-84
4	Poor	65-74
5	Reject	64-below

2.3 Production of prototype arm chair furniture

2.3.1 Fabrication of prototype armchairs

To assess the suitability of *M. azedarach* wood for furniture production, two prototype armchairs were fabricated at the Pampanga Furniture Industries Foundation, Inc. (PFIFI)'s common service facility in Mabalacat, Pampanga, Philippines. A high-solids (48–50%) polyvinyl acetate adhesive (PVAc-D3), suitable for interior and limited exterior applications (Barboutis and Kamperidou, 2021), was used to assemble all prototype armchairs. The

adhesive was applied to the bonding surfaces—mortise walls, tenon shoulders, and dowel holes—using a brush to ensure complete coverage. The glue spread rate was approximately 180 g/m², consistent with manufacturer recommendations and within the optimal 150–200 g/m² range reported by Jimenez and Ramos (2023). After application, the joints were assembled immediately and subjected to uniform pressure using parallel bar clamps. The assemblies were kept under ambient Philippine indoor conditions typical of a naturally ventilated workshop (28–32 °C, 75–80% RH) for a 24 h clamping period. After clamp removal, the units were left to cure under the same conditions for an additional 7 days to ensure full bond-strength development.

The study design necessitated a direct comparison of joining systems. Thus, the prototypes were constructed utilizing only one joining system per chair (i.e., no mixed joining systems were employed). This exclusion of mixed joints was intended to ensure a clear determination of which joint type—the mortise-and-tenon or the dowel joint—would best withstand the rigorous testing requirements of ISO 7173. The dimensions of the joints were designed to be structurally proportional to the cross-sectional size of the primary structural members of the chair. Fig. 1 illustrates the specific joint configurations used for a frame connection in each prototype.

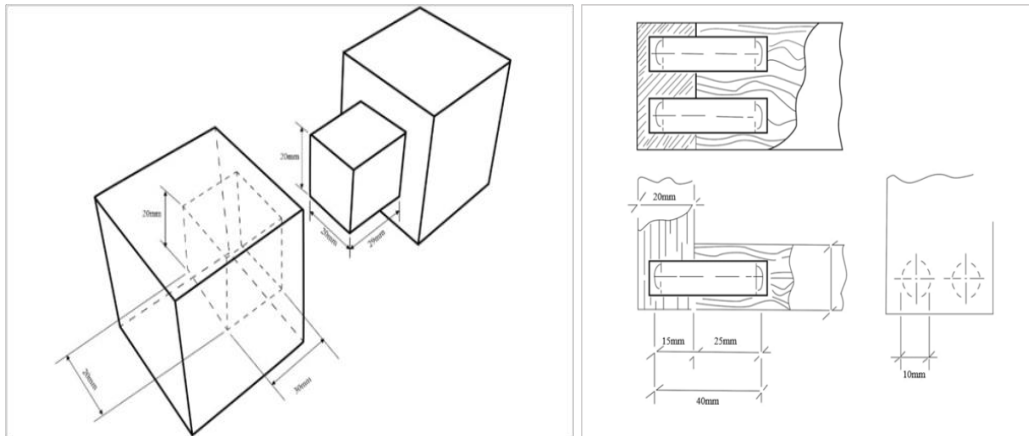


Figure 1. Specific joint configurations and dimensions used for the prototype armchairs. On the left image shows the mortise-and-tenon joint; on the right image shows the dowel joint.

2.4 Performance evaluation of prototype armchairs

2.4.1 Conditioning and test procedure

The structural performance of the two prototype armchairs was evaluated at the FPRDI Furniture Testing Center (FFTC). Before testing, both samples were conditioned for one month at 23±2°C and 65±5% RH to allow the adhesive joints to achieve their full curing strength.

Testing was conducted in accordance with ISO 7173:1989 (Furniture—Chairs and stools—Determination of strength and durability) using test standard level 3. Fig. 2 illustrates the testing sequence applied to both prototypes. The evaluation consisted of the application of static loads (damage initiation), cyclic loading or fatigue forces (damage propagation), and impact loads (residual strength assessment), in compliance with the level 3 loading requirements of the standard.



Figure 2. Sequential procedure of armchair furniture testing following ISO 7173:1989

2.4.2 Evaluation of test performance

The performance of the prototype armchairs was assessed using a pass/fail criterion in accordance with the ISO 7173 standard. The primary objective of the study was compliance and suitability validation, rather than comparative statistical analysis of strength values. This approach is consistent with international furniture testing standards, including ISO 7173:1989 and related BS EN standards, which specify that the test specimen is a single, finished, production-representative prototype.

A prototype is considered compliant if it withstands the prescribed loads and cycles at the selected test level (Level 3) without exhibiting any of the failure modes defined in Clause 8 of the standard. In commercial and engineering practice, furniture testing is an exhaustive and sequential validation process; testing a single chair typically requires approximately two weeks, and any failure necessitates design modification, not replication or statistical retesting.

This procedure reflects standard practice for third-party qualitative furniture testing in the Philippines, where factories often conduct internal preliminary load tests before submitting a single prototype to an external accredited testing laboratory.

2.5 Statistical Analysis

The effects of the experimental variables on wood machining tests, specifically knife cutting angles for planing and spindle speeds for turning and boring, on surface quality ratings were analyzed using the Kruskal–Wallis H test. This non-parametric method was selected due to the ordinal nature of the surface quality grading data. Where a significant difference among treatments was detected, post-hoc mean comparisons were subsequently conducted to identify differences between specific experimental groups.

3 Results and discussion

3.1 Wood machining characteristics of *M. azedarach*

The machining characteristics of *M. azedarach* lumber were evaluated using the ASTM D-1666-22 surface quality rating system. Results of the five machining operations (planing, turning, boring, shaping, and mortising) are presented in Table 3, with representative machined surfaces shown in Fig. 3.

Table 3. Result of machining test conducted on *Melia azedarach* wood samples

Machining Test	Knife Angle (°)/ Spindle Speed (rpm)	Chi-Square Value ^a	Pr > Chi-square	Average grade / % Defect-free ^b	Rating / Surface Quality
Planing	20° / 4000	19.5209	<0.0001**	93.80 B	Good
	25° / 4000			98.40 A	Excellent
	30° / 4000			98.80 A	Excellent
Turning	1150	0.5800	0.7483 ns	2.20 A	Good
	2050			2.30 A	Good
	4025			2.40 A	Good
Boring	1300	6.1219	0.0468*	1.400 A	Excellent
	2300			1.150 AB	Excellent
	3900			1.100 B	Excellent
Shaping	7000	-	-	1.50	Excellent
Mortising	3440	-	-	1.40	Excellent

Note: ^a Kruskal-Wallis test was used to determine the significance of the difference between treatment groups (Knife Angle or Spindle Speed). ** Significant at $P < 0.001$. * Significant at $P < 0.05$. ns Not significant. ^b Average Grade / % Defect-Free: For Planing, the value represents the percentage of defect-free area (1 = 95%-100 %, ..., 5 = 64% below). For Turning, Boring, Shaping, and Mortising, the value represents the average surface quality grade based on the 5-grade visual scale (Grade 1 = Excellent, Grade 5 = Reject). Statistical Grouping Letters (A, AB, B): Means followed by the same letter within a column for each test are not significantly different at the $\alpha = 0.05$ significance level, as determined by a post-hoc mean comparison test.

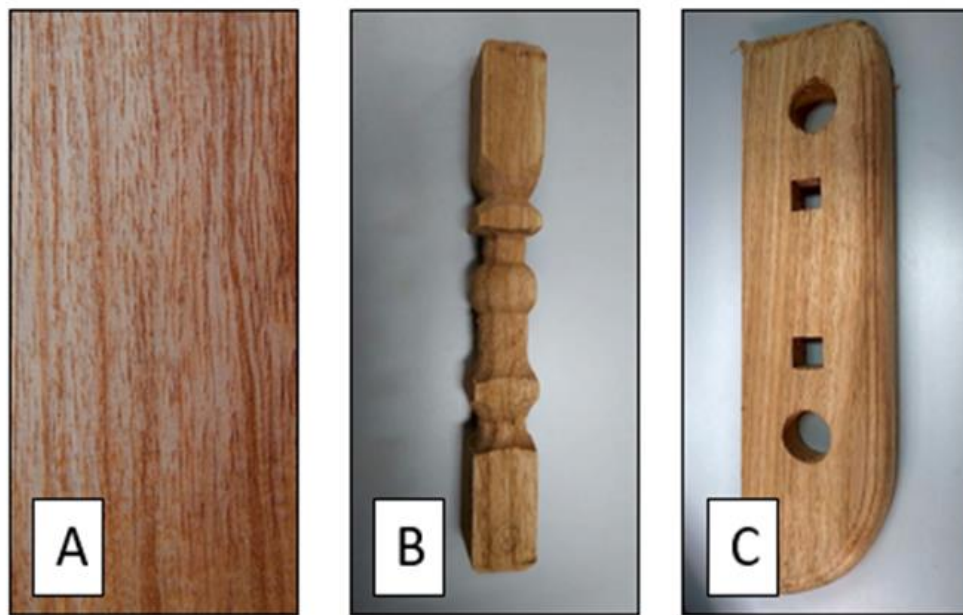


Figure 3. Representative samples of *M. azedarach* wood machined by planing (A), turning (B), boring, mortising, and shaping (C)

3.1.1 Planing

The planing test showed a highly significant influence of hook angle on surface quality ($p < 0.0001$). The 30° hook angle resulted in an "Excellent" rating (98.80%), followed closely by the 25° (98.40%). In contrast, the 20° hook angle resulted in a lower defect-free area percentage at 93.80%, which was rated "Good." Statistical grouping confirmed that 25° and 30° were similar in performance, and both outperformed the 20°. This indicates that higher hook angles are more suitable for planing *M. azedarach*.

This improvement at 25–30° is linked to the transition from an aggressive cutting-dominant action at 20° to a more controlled shearing/scraping action at higher cutting angles. This behavior is consistent with machining responses observed in most medium-density hardwoods written in the works of Davis (1942) and Csanády and Magoss (2013). Belleville et al. (2016) similarly reported reduced torn grain incidence in plantation eucalypts when knife blade angles are operated within this range.

The machining characteristics are strongly tied to the ring-porous anatomy of *M. azedarach* (Figs. 4A and 4B). The image in Fig. 4-B clearly shows a high structural heterogeneity of large earlywood vessels at the beginning of the growth ring, transitioning abruptly to smaller scattered vessels within the denser latewood fibers. Ring-porous topography of wood exhibits a higher tendency for surface tearing and surface roughness, especially on the larger and lower-density vessels (Davis, 1942; Hoadley, 2000; Thoma et al., 2015; Laina et al., 2017; Jankowska, 2020, Kang et al., 2023). At 20°, machining defects like fiber lifting, chip marks, and fuzzy grain were frequently observed, indicating unstable cutting mechanics. The higher angles (25–30°) facilitated a more gradual cutting action, reducing fiber pull-out between earlywood and latewood cells. Thus, for commercial planing of *M. azedarach*, hook angles between 25° and 30° are recommended to minimize defect expression and achieve a smooth surface finish.

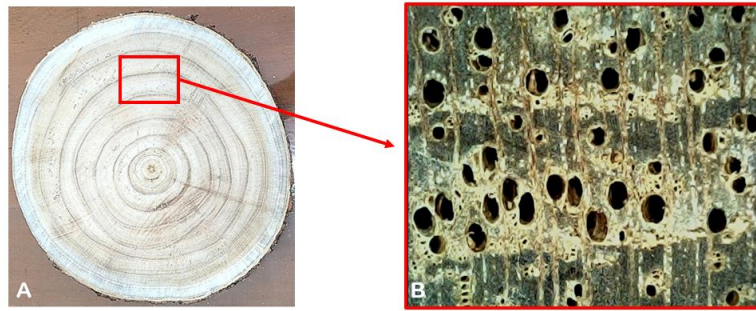


Figure 4. A: Transverse (cross-sectional) view of a *Melia azedarach* log, displaying distinct annual growth rings. B: Microscopic magnification of the wood's transverse section (indicated by the red box in A), illustrating the characteristic ring-porous vessel arrangement.

3.1.2 Turning

Turning results showed no significant effect of spindle speed on surface quality ($p = 0.7483$). All tested speeds (1150, 2050, and 4025 rpm) consistently resulted in "Good" rating from 2.20 to 2.40.

Rather than machine cutting speed, the consistent presence of torn and fuzzy grain suggests that intrinsic anatomical heterogeneity is the dominant factor limiting surface quality. The large earlywood vessels of ring-porous species provide weak support during lateral cutting, promoting fiber tear-out and unsheared patches (Davis, 1942; Wengert, 1998). Crucially, the abrupt transition zone between the low-density earlywood and the high-density latewood acts as a pre-determined mechanical weak boundary layer. This structural discontinuity concentrates stress during the machining compression phase. Studies using finite element modeling (FEM) have confirmed that mechanical machining operations (like planing, which shares cutting physics with turning) generate microscopic tip-cracks in this transition zone and within the weaker earlywood region (Stehr and Östlund, 2005). Thus, the macroscopic defects of torn and fuzzy grain in *M. azedarach* represent the initiation and propagation of these structural fractures, which are inherently promoted by the wood's ring-porous anatomy.

Additionally, sample burning observed at all speeds indicates excessive friction, likely caused by either limited clearance angle or inadequate tool sharpness (Csanády and Magoss, 2013). Since speed was statistically irrelevant, optimizing tool geometry and maintaining sharp cutting edges are more critical than increasing spindle speed to achieve higher-quality turning of this species.

3.1.3 Boring

All three boring spindle speeds (1300, 2300, 3900 rpm) achieved an overall "Excellent" rating, but the Kruskal–Wallis test showed a significant difference among them ($p = 0.0468$). The higher speeds were statistically superior to the lowest speed (Table 3).

The generally excellent response can be attributed to *M. azedarach*'s relatively straight grain, which reduces the likelihood of fiber tear-out damage at the hole periphery. Nevertheless, the superiority of the higher speeds is scientifically meaningful: a faster spindle increases the number of cutting engagements per unit fiber length, thereby reducing the window for fiber deformation before fracture, and encouraging cleaner severance. This is consistent with machining theory for heterogeneous woods (Wengert, 1998; Csanády and Magoss, 2013) and with recent findings that increasing spindle speed tends to improve surface integrity in high-speed wood cutting (Aras and Sofuoğlu, 2021; Yaghoubi and Rabiei, 2025).

3.1.4 Mortising

The hollow-chisel mortising test yielded an average grade of 1.40, again rated "Excellent." This high quality is expected as the mortising process inherently combines a boring bit that severs fibers perpendicular to the grain, followed by a chisel that shears the waste, minimizing fiber pull-out.

The observed minor defects, such as fiber tearing, chip marks, and burnt areas, are likely due to operational rather than fundamental anatomical causes. Side pressure from the chisel, tool eccentricity, or dull edges can introduce tearing or smearing. Friction and heat buildup are the usual causes of burn marks. This is often because the bit–chisel clearance is suboptimal or the feed rate is too low, resulting in high dwell time (Davis, 1942; Wengert 1998; Csanády and Magoss, 2013). However, more recently, Hu et al. (2024) studied mortise/tenon surface roughness and emphasized that machining precision and measurement position affect derived roughness values.

Wood machinists should follow several best practices to achieve near-flawless mortising quality in *M. azedarach*. These include maintaining a concentric and sharp bit–chisel assembly, ensuring accurate clearance, and calibrating feed to avoid excessive dwell near surfaces.

3.1.5 Shaping

In the shaping test, the speed of 7000 rpm resulted in a mean surface grade of 1.50, which corresponds to an "Excellent" rating. The high-quality mark is largely due to the cutter operating mostly parallel to the grain along straight sections of the board.

However, localized defects such as chip marks, rough grain, and torn fibers were observed, especially on curved edges where the cutter intersects the grain. In ring-porous wood like *M. azedarach*, the transition from earlywood to latewood within a cut favors fiber lifting where support is weak on earlywood and tearing where density is high on latewood. These kinds of challenges in machining coarse-textured hardwoods have been well documented since Davis (1942) and remain relevant in modern studies of wood surface quality.

Recent research also suggests that tool cutting geometry and sharpness, as well as the engagement strategy, become especially critical in such mixed-anatomy zones. For instance, the review on tool wear and surface quality states that the final surface quality in machining is strongly dependent on tool geometry, the processed material properties, and operational parameters (Sergeevichev et al., 2022). In a study by Yaghoubi and Rabiei (2025), they demonstrated that adopting different machining strategies, like a raster technique, can significantly reduce surface imperfections.

Thus, while shaping *M. azedarach* is quite feasible, achieving flawless surfaces along curved features may require using finishing passes, minimizing cutter cross-grain engagement, or optimizing tool path strategies to reduce abrupt transitions.

3.2 Performance evaluation of prototype armchair furniture

Two prototype armchairs were assessed for structural performance. The first armchair was built using mortise and tenon (MT) joints, and the second used dowel joints. The assessment followed ISO 7173:1989 Test Level 3, which is designed for severe domestic and contract use conditions. Static, fatigue, and impact tests were conducted according to the standard, and the results are summarized in Table 4. Both prototypes passed all test categories and met the qualitative inspection criteria specified in Clause 8 of the ISO standard (Table 5), with no

fractures, permanent loosening, functional impairment, or audible failure detected during or after loading.

All static load tests (seat, back, arm, and leg loading) returned a PASS for both joint systems under the prescribed repetitions and force levels. Similarly, the seat and back fatigue tests (50,000 cycles at 950 N seat load and 330 N back load) and the multiple-drop impact tests resulted in no structural failures. Post-test dimensional checks and manual inspections confirmed no permanent deformation, no detectable joint creep under hand pressure, and no visible cracking through the full thickness of any member, corroborating the qualitative pass ratings in Table 5.

Accordingly, the use of one prototype chair specimen per joint-system configuration (Mortise-and-Tenon vs. Dowel Joint) in this study is consistent with established practice for destructive, time-intensive validation testing. Structural failures, joint loosening, deformation, and excessive deflection were recorded when observed. When failures occurred, the corresponding failure modes were analyzed, and recommendations for design refinement or material enhancement were formulated. Conversely, when a prototype exhibited no failure, the design was considered suitable for subsequent replication in production.

Table 4. Summary of performance test results of the prototype armchair using test level 3 of ISO 7173:1989

Test	Loading	Test Level 3	Armchair Joint Design	
			Dowel	Mortise and Tenon
Seat static load	force (N), 10 times	1 300	Passed	Passed
Back static loading	force (N), 10 times	560	Passed	Passed
Balancing load	force (N)	1 300		
Arm sideways static load	force (N), 10 times	400	Passed	Passed
Arm downwards static load	force (N), 10 times	800	Passed	Passed
Seat fatigue test	cycles, seat load 950 N	50 000	Passed	Passed
Back fatigue test	cycles, back load 330 N	50 000	Passed	Passed
Balancing load	seat load 950 N			
Leg forward static load	force (N), 10 times	500	Passed	Passed
Balancing load	seat load (N)	1 000		
Leg sideways static load	force (N), 10 times	390	Passed	Passed
Balancing load	seat load (N)	1 000		
Seat impact test	drop height (mm), 10 times	180	Passed	Passed
Back impact test	height (mm), 10 times	210	Passed	Passed
Arm impact test	angle (degrees), 10 times	38	Passed	Passed
Drop test	drop height (mm) 10 times at 10° angle	100	Passed	Passed

Mechanically, this outcome demonstrates two key points. First, *M. azedarach* possesses the necessary stiffness, compressive resistance, and bending capacity at critical members and joints to withstand Level 3 loading without localized crushing or fiber failure. This observation supports findings from earlier studies showing that properly conditioned and machined plantation-grown hardwoods can meet the structural and fatigue performance requirements for furniture applications when processed under controlled manufacturing conditions (Lim et al., 2002, Tsai, 2023). Plantation hardwoods such as rubberwood and acacia have similarly been shown to provide adequate mechanical reliability when machined precisely with an appropriate moisture content for furniture joinery (Lim et al., 2002).

Table 5. Clause 8. Inspection and assessment of qualitative test based on ISO 7173:1989

Inspection and Assessment Results	Observations
Any fracture of any member, joint or component, including seat suspension and castors	none
Any fracture or cracking through the full thickness of any part of a structural shell	none
Any loosening, shown to be permanent by hand pressure applied to suitable members, or joints intended to be rigid	none
Any loosening, relative to the shell surface of the under frame or base inserts moulded into a structural shells, shown to be permanent by means of hand pressure applied to the under frame or base	none
Any free movement in the back, arms, legs or other components of the article greater than the noted in the initial inspection	none
Any deformation or any cracks that will adversely affect the appearance or strength of any part of the sample	none
Any impairment of the operation of any mechanical part	none
The development of any clearly audible noise as a result of testing	none

Second, despite the common perception that MT joints inherently provide superior strength for structural assemblies (Erdil et al., 2005; Tankut and Tankut 2005; Derikvand and Ebrahimi, 2014; Uysal and Haviarova, 2021), the dowel-joined prototype in this study performed equivalently to the MT-joined unit in all static and fatigue categories. This result is consistent with recent analytical and experimental works that dowel joint efficiency is highly sensitive to assembly parameters such as hole alignment, dowel diameter, embedment length, and adhesive penetration. When optimized, dowel joints can closely approach or even match the moment capacity and diagonal stiffness of traditional MT joints in frame constructions (Hao et al., 2020; Kuşkun et al., 2021; Janikova et al., 2025).

Overall, the results indicate that *M. azedarach*, a locally available and fast-growing species, can reliably serve as a structural material for both traditional joinery systems and modern dowel-based mass-production applications. This supports the localization of the furniture value chain and the substitution of imported or exotic hardwoods with sustainable, domestically sourced species. The findings are consistent with the earlier study of Marasigan et al. (2025), which reported that *M. azedarach* possesses mechanical properties suitable for furniture manufacture—specifically a modulus of rupture (MOR) of 65.4 MPa and a modulus of elasticity (MOE) of 7.3 GPa—values comparable to those of widely used exotic species such as *Gmelina arborea* (MOR = 64.7 MPa; MOE = 7.0 GPa) and *Swietenia macrophylla* (MOR = 66.9 MPa; MOE = 7.1 GPa). Furthermore, the present findings reinforce broader conclusions from recent multi-criteria analyses that the mechanical reliability of furniture frames is governed more by joint geometry, machining precision, and adhesive bond quality than by the intrinsic ranking of wood species alone (Klos et al., 2018; Vlaović et al., 2024).

4 Conclusions

Based on the evaluation of the machining characteristics and structural performance of prototype furniture, the following can be concluded from this study:

M. azedarach exhibits "Good" to "Excellent" overall machining characteristics.

- Planing: Optimal surface quality ("Excellent") is achieved at higher knife hook angles (25° and 30°).
- Boring: The quality is "Excellent" and significantly improves with faster spindle speeds (2300 rpm and 3900 rpm),
- Turning, shaping, and mortising: All operations demonstrated favorable workability from "Good" to "Excellent" surface quality. The observed minor defects, such as

chip marks, fuzzy grain, and torn grain, were minimal, indicating that these can be easily managed by standard finishing techniques such as sanding.

M. azedarach is highly suitable for furniture manufacture as demonstrated by its successful compliance with the ISO 7173:1989 Level 3 requirements.

- Mortise and tenon and dowel jointing systems used in the prototypes successfully passed all strength and durability tests at Level 3 of the ISO 7173:1989 standard.
- This wood species possesses the structural integrity and joint strength required for durable furniture manufacture.

M. azedarach is therefore recommended as a viable, indigenous, and sustainable substitute for traditional and commercial plantation species in the production of furniture and other builder's woodworks owing to its favorable machining properties and proven structural performance. The use of sharp cutters, well-maintained machinery, and light cutting depths is recommended for optimal machining outcomes.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial and institutional support of DOST-FPRDI, as well as the to the DOST-NRCP “CareeR” Mentoring Program for providing mentoring support in developing this manuscript, which significantly contributed to the completion of this work. Appreciation is also extended to Engr. Victor G. Revilleza for his technical assistance during the machining operations and furniture performance testing. The authors likewise acknowledge Engr. Jovito A. Elec, Mr. Jonaz Nicolo T. Labastilla, Mr. Laidon L. Lastimoso, and Mr. Rosaurio L. Reyes Jr. for their support in the sawmilling, lumber preparation, and specimen fabrication for machining evaluation and prototyping of *M. azedarach*; Forester Oliver Marasigan for providing the log cross-section and microscopic images of *M. azedarach*. Lastly, the Pampanga Furniture Industries Foundation, Inc thru Ms. Lisa Samia for the manufacture of two armchair prototypes.

Author Contributions

Alvin F. Vardeleon: Conceptualization, Data curation, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Supervision, Writing – original draft, **Juanito P. Jimenez, Jr.:** Conceptualization, Data analysis, Supervision, Writing – original draft, – review & editing, Validation, **Oswald David F. Ilagan:** Data gathering and analysis, Visualization, **Edward Paul S. Marasigan:** Data gathering and analysis, Visualization.

Funding statement

This project was supported by the DOST-FPRDI with project number 2022011

Conflict of interest statement

The authors declare no conflict of interest

References

- Aguilos, R., Marquez, C., Adornado, H., and Aguilos, M., (2020). Domesticating commercially important native tree species in the Philippines: Early growth performance level, *Forests* 11(8), 885, DOI: [10.3390/f11080885](https://doi.org/10.3390/f11080885)
- Alipon, M. A., Alcachupas, P. L., Bondad, E. O., and Cortiguerra, E. C., (2017). Properties and utilization of *Acacia mangium* Willd. timber at different ages and sites in Caraga Region, Philippines, *Lignocellulose*, 6(2), 74-87.

- Alipon, M. A., Bondad, E. O., Gilbero, D. M., Jimenez, J. J. P., Domingo, E. P., and Marasigan, O. S., (2021). Anatomical properties and utilization of 3-, 5-, and 7-yr-old falcata (*Falcataria moluccana* (Miq.) Barneby & JW Grimes] from Caraga Region, Mindanao Philippines, *Philippine Journal of Science*, 150(5), 1307-1319.
- Aras, O., and Sofuoğlu, S. D., (2021). The relationship of machining parameters with surface roughness in machining of chestnut (*Castenia sativa* Mill.) tree species with CNC, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 4(2), 114-125. DOI: [10.33725/mamad.992157](https://doi.org/10.33725/mamad.992157)
- ASTM D1666-2022. Standard test methods for conducting machining tests of wood and wood-base panel materials.
- Barboutsis, I., and Kamperidou, V., (2021). Shear strength of beech wood joints bonded with commercially produced PVAc D3 adhesives, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 105, 102774. DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2020.102774](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102774)
- Belleville, B., Ashley, P., and Ozarska, B., (2016). Wood planing properties of Australian plantation-grown eucalypts, *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(3), 425-434. DOI: [10.4067/S0718-221X2016005000038](https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000038)
- Carmelo, W.H., (2005). DOST-FPRDI furnace-type lumber dryer, *Forest Products Technoflow Series*, 14, 1–14.
- Csanády, E., and Magoss, E., (2013). *Mechanics of wood machining* (pp. 168-171). Berlin: Springer.
- Davis, E. M., (1942). Machining and related characteristics of southern hardwoods. *Tech. Bull*, 324.
- DENR-FMB., (2023). Philippine Forestry Statistics. https://drive.google.com/file/d/1uYMd6FJosiT-12ltzZM8veYujjK_u3t3/view
- Derikvand, M., and Ebrahimi, G., (2014). Strength performance of mortise and loose-tenon furniture joints under uniaxial bending moment, *Journal of Forestry Research*, 25(2), 483–486. DOI: [10.1007/s11676-014-0479-5](https://doi.org/10.1007/s11676-014-0479-5)
- Erdil, Y. Z., Kasal, A., and Eckelman, C. A., (2005). Bending moment capacity of rectangular mortise and tenon furniture joints, *Forest Products Journal*, 55(12), 209–213.
- Fern, K., (2014). *Melia azedarach*. Tropical Plants Database. Retrieved from <http://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Melia+azedarach>
- Hao, J., Xu, L., Wu, X., and Li, X., (2020). Analysis and modeling of the dowel connection in wood T-type joint for optimal performance, *Composite Structures*, 253, 112754. DOI: [10.1016/j.compstruct.2020.112754](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112754)
- Hoadley, B.R., (2000) *Understanding wood: a craftsmans guide to wood technology*. 280 p. Taunton Press.
- Hu, W. G., Yu, R. Z., and Yang, P., (2024). Characterizing roughness of wooden mortise and tenon considering effects of measured position and assembly condition. *Forests*, 15(9), 1584. DOI: [10.3390/f15091584](https://doi.org/10.3390/f15091584).
- ISO 7173:1989. Furniture — Chairs and stools — Determination of strength and durability.

- Janíková, N., Šimek, M., Kořený, A., Gaff, M., and Hlavatý, J., (2025). Comparing furniture joint variants using a multi-criteria analysis, *Wood Material Science & Engineering*, 1-10, DOI: [10.1080/17480272.2024.2445548](https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2445548)
- Jankowska, A. (2020). Understanding of surface roughness of wood based on analysis its structure and density, *Annals of Warsaw University of Life Sciences SGGW Forestry and Wood Technology*, 111, 27-31. DOI: [10.5604/01.3001.0014.6421](https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.6421)
- Jimenez, J.J.P., Escobin, R., and Conda, J.M., (2015). Profile of wood species used in local and imported plywood and their bond performance, *Philippine Forest Products Journal*, 6, 43-58.
- Jimenez, J.J.P., (2023). Drying Characteristics of Pandan (*Pandanus simplex* Merr.) Leaves Using the DOST-FPRDI Furnace-type Dryer, *Philippine Journal of Science*, 152, 2139-2147
- Jimenez J.J.P., Gilbero, D. M., and Alipon, M. A., (2021). Veneer and plywood properties of yemane (*Gmelina arborea* Roxb.) from 3-, 5-, and 7-year-old plantation trees. *International Wood Products Journal*, 12(4), 277-286, DOI: [10.1080/20426445.2021.1979823](https://doi.org/10.1080/20426445.2021.1979823)
- Jimenez J.J.P., Gilbero, D. M., and Alipon, M. A., (2022). Evaluation of young falcata plus-trees for veneer and plywood production in the Philippines, *Philippine Journal of Science*, 151 (6A), 2081-2092
- Jimenez, J. J. P., and Ramos, J. E. C., (2023). Gluing characteristics of giant bamboo using four commercial adhesives, *Philippine Journal of Science*, 152(5), 1809-1822.
- Joshi, R. C., (2006). Invasive alien species (IAS): concerns and status in the Philippines. In *Proceedings of the International Workshop on the Development of Database (APASD) for Biological Invasion*. FFTC, Taichung, Taiwan, China (pp. 1-23).
- Kang, C. W., Hashitsume, K., Jang, E., and Kolya, H., (2023). Relationship between wood anatomical features and surface roughness characteristics, *Wood Research*, 68, 455-464. DOI: [10.37763/wr.1336-4561/68.3.455464](https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/68.3.455464)
- Kłos, R., Fabisiak, B., and Ng, H.K.T., (2018). Comparative reliability analysis of selected joints for case furniture, *BioResources*, 13(3), 5111–5123, DOI: [10.15376/biores.13.3.5111-5123](https://doi.org/10.15376/biores.13.3.5111-5123)
- Kuşkun, T., Smardzewski, J., and Kasal, A., (2021). Experimental and numerical analysis of mounting force of auxetic dowels for furniture joints, *Engineering Structures*, 226, 111351. DOI: [10.1016/j.engstruct.2020.111351](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111351)
- Laina, R., Sanz-Lobera, A., Villasante, A., López-Espí, P., Martínez-Rojas, J. A., Alpuente, J., and Vignote, S., (2017). Effect of the anatomical structure, wood properties and machining conditions on surface roughness of wood, *Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(2), 203-212. DOI: [10.4067/S0718-221X2017005000018](https://doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000018)
- Lim, S. C., Ten Choo, K., and Gan, K. S., (2002). The characteristics, properties and uses of plantation timbers-rubberwood and *Acacia mangium*, *Timber Technology Centre, FRIM*.
- Marasigan, O. S., and Mundin, M. A. M., (2024). Physico-mechanical properties and potential utilization of *Melia azedarach* L. grown in Quezon Province, the Philippines, *Philippine Journal of Science*, 153(4), 1429-1441.

- Marasigan, O. S., Daguinod, S. A., and Villareal, J. F., (2025). Physico-mechanical properties of two native tree species in the Philippines and their potential as alternatives to exotic industrial tree plantation species, *Environment and Natural Resources*, 23(4), 343-356, DOI:[10.32526/ennrj/23/20250038](https://doi.org/10.32526/ennrj/23/20250038)
- Natividad, R. A., (2016). Pioneer tree species: Their potential uses and harvesting constraints, *Ecosystems and Development Journal*, 6(1), 32-36.
- Pinol, A., Perino, E., Pollisco, M., San Valentin, H. O., and Pachon, M. V., (2017). A Report on the Stocktaking of National Forest Invasive Species (FIS) Activities in the Philippines. Asia-Pacific Forest Invasive Species Network (APFISN).
- Sergeevichev, A., Vlasov, E., Lebedev, A., and Bogatova, E., (2022). Investigation of the surface quality and tool wear when forming the edges of wood materials, In International School on Neural Networks, Initiated by IIASS and EMFCSC (pp. 1531-1540). Cham: Springer International Publishing.
- Stehr, M., and Östlund, S., (2005). An investigation of the crack tendency on wood surfaces after different machining operations, *Wood Research and Technology*, 54(4), 427-436.
- Tankut, A. N., and Tankut, N., (2005). The effects of joint forms (shape) and dimensions on the strengths of mortise and tenon joints, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 29(6), 493-498.
- Thoma, H., Peri, L., and Lato, E., (2015). Evaluation of wood surface roughness depending on species characteristics, *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(2), 285-292, DOI:[10.4067/S0718-221X2015005000027](https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000027)
- Tsai, T. H., (2023). *Value-added to Small-Diameter Timber* (Obtained from Hardwood Plantations) (Master of Science Thesis, Purdue University Graduate School).
- Tulod, A. M., Casas, J. V., Marin, R. A., and Ejoc, J. A. B., (2017). Diversity of native woody regeneration in exotic tree plantations and natural forest in Southern Philippines, *Forest Science and Technology*, 13(1), 31-40, DOI:[10.1080/21580103.2017.1292958](https://doi.org/10.1080/21580103.2017.1292958)
- Uysal, M., and Haviarova, E., (2021). Evaluating design of mortise and tenon furniture joints under bending loads by lower tolerance limits, *Wood and Fiber Science*, 53(2), 109-125, DOI:[10.22382/wfs-2021-13](https://doi.org/10.22382/wfs-2021-13)
- Vlaović, Z., Gržan, T., Župčić, I., Domljan, D., and Mihulja, G., (2024). Strength, durability, and aesthetics of corner joints and edge banding in furniture design: a review, *Applied Sciences*, 14(22), 10285. DOI:[10.3390/app142210285](https://doi.org/10.3390/app142210285)
- Wengert, E. M., (1988). The wood doctor's Rx. Brook Forest Products Center, Department of Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University. 378 p.
- Yaghoubi, S., and Rabiei, F., (2025). A profound evaluation of different strategies to improve surface roughness of manufactured part in wood-CNC machining process, *Journal of Engineering Research*, 13(3), 1854-1860, DOI: [10.1016/j.jer.2024.05.033](https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.05.033)



A perceptual impact model of material, quality, and identity in wood furniture consumers' value associations

Andrea Reményi^{1*} 

ABSTRACT: Wood functions simultaneously as a material and as a symbolic, aesthetic, and identity-shaping medium in the context of furniture products. This study investigates how perceptual and emotional factors influence material-related value formation and purchase intention within the wood-based furniture segment. Based on neuroaesthetics and identity psychology, a novel Perceptual Impact Model was developed and tested using nine psychometric indices, including the Emotional Sensory Load Index (ESLI), Perceived Craft Distinctiveness Index (PCDI), Aesthetic Cognitive Activation Index (ACAI), and Identity Resonance Quotient (IRQ). Data were collected from 145 participants selected according to criteria ensuring thematic and psychographic alignment with the aims of the study. Statistical analyses confirmed the significant influence of aesthetic coherence and symbolic identification on consumer engagement (e.g., IRQ ↑41% in the high-sensitivity group, $p < 0.01$). The findings highlight key drivers such as multisensory engagement, craftsmanship perception, and the alignment between self-image and material aesthetics. By translating subjective experience into quantifiable metrics, the model strengthens strategic design and branding decisions, supporting sustainable innovation across the wood-based value chain.

Keywords: Wood-Based Product Strategy, Value Integration, Decision Support

Ahşap mobilya tüketicilerinin değer ilişkilerinde malzeme, kalite ve kimliğin algısal etki modeli

ÖZ: Ahşap, mobilya ürünleri bağlamında hem bir malzeme hem de sembolik, estetik ve kimlik şekillendirici bir ortam olarak aynı anda işlev görmektedir. Bu çalışma, algısal ve duygusal faktörlerin, ahşap bazlı mobilya segmentinde malzeme ile ilgili değer oluşumunu ve satın alma niyetini nasıl etkilediğini incelemektedir. Nöroestetik ve kimlik psikolojisi temelli olarak, Dokunsal Etki Modeli (Perceptual Impact Model) geliştirilmiş ve Duygusal Duyusal Yük İndeksi (ESLI), Algılanan Zanaatkarlık Ayırt Ediciliği İndeksi (PCDI), Estetik Bilişsel Aktivasyon İndeksi (ACAI) ve Kimlik Rezonans Katsayısı (IRQ) dahil olmak üzere dokuz psikometrik göstergeyle test edilmiştir. Veriler, çalışmanın tematik ve psikografik hedefleriyle uyumu sağlayacak kriterlere göre seçilen 145 katılımcıdan toplanmıştır. İstatistiksel analizler, estetik tutarlılığın ve sembolik özdeşleşmenin tüketici bağlılığı üzerindeki önemli etkisini doğrulamıştır (örneğin, yüksek hassasiyet grubunda IRQ %41 artış, $p < 0,01$). Bulgular, çok duyulu etkileşim, zanaatkarlık algısı ve öz imge ile malzeme estetiği arasındaki uyum gibi temel itici faktörleri vurgulamaktadır. Model, öznel deneyimleri nicel göstergelere dönüştürerek stratejik tasarım ve marka kararlarını sağlamlaştırmakta, ahşap bazlı değer zinciri genelinde sürdürülebilir yeniliği desteklemektedir.

Anahtar kelimeler: Ahşap-temelli ürün stratejisi, Değer entegrasyonu, Karar desteği

1 Introduction

As a natural and renewable raw material, wood has regained strategic relevance in contemporary furniture design, particularly within the premium segment (Hosey, 2012; Dharsono, 2025). Shifting global consumer trends increasingly favour organic, sustainable, and emotionally rich materials that merge ecological awareness with aesthetic sophistication and serve identity-shaping purposes (Manna, 2025; Al Darwish, 2023). This emerging perspective also activates complex psychological, cultural, and neurological processes (Thakral et al., 2012).

In premium furniture, wood's role goes far beyond functionality — it embodies affective and cognitive dimensions, serving as a medium for emotional, ethical, and identity-related meanings. Consumers in this segment often base their decisions on material-related value associations. While many studies have examined wood's biological or physical properties, few have explored the systemic relationship between perceived material quality, consumer identity, and product choice in the context of wood-based furniture. Recent research has also highlighted material perception as a key mediator of sustainable consumer behaviour and design aesthetics (Karana et al., 2015; Pedgley et al., 2020).

At the same time, integrated frameworks from perceptual psychology offer new tools for analysing internal representations, emotional responses, and motivational patterns related to material selection (Earnshaw, 2017). These approaches allow the perceived meanings of wood products to be translated into measurable and comparable indices. This study introduces a novel perceptual framework integrating material quality perception and identity-related value associations, which has not been systematically modelled in previous wood design research.

The aim of this study is to determine how perceptual and affective factors, measured through nine psychometric indices, shape material-related value formation and decision-making among premium wood-based furniture consumers. The research applies an empirically validated model to identify the underlying emotional, aesthetic, and symbolic mechanisms through which wood contributes to value perception and purchase intent. This approach enables the translation of subjective user experiences into quantifiable data, supporting design, branding, and communication strategies within the premium segment. The findings offer not only theoretical contributions but also practical insights into how wood may be more effectively positioned, not merely as a raw material, but as a multisensory, emotionally resonant concept that strengthens the cultural and competitive relevance of sustainable design innovation (Manu et al., 2022).

2 Material and Method

2.1 Research context

The study was conducted within a clearly defined perceptual-experiential domain, interpreted through the representation of a target group that consumes and interprets premium wood-based furniture. In this sense, the research field focused on globally emerging wood perception patterns within a socially and culturally embedded, intellectual context, using an online research environment. Respondents predominantly comprised highly educated, urban individuals who actively engage in cultural consumption and show openness towards premium product categories. Participants typically demonstrated aesthetic sensitivity and receptiveness to themes associated with natural materials, sustainability, and value-based choices, making them particularly suited to the study of neuroaesthetic and identity-related wood perception. This perceptual "research zone" was delineated through participants'

material preferences, decision-making mechanisms, and psychological response patterns to wood. Mapping this interpretive domain was essential for developing and validating the eleven distinct indices measuring various dimensions of wood perception, from sensory detection and moral value to purchase intent.

2.2 Data collection

Data were gathered via a quantitative online questionnaire, completed by a sample of 145 participants, as part of a doctoral research project. Respondents were selected from an international professional network of approximately 5,566 individuals, built through my academic and research collaborations. While randomly accessed within the network, the sample was specifically segmented at entry level to target individuals who owned wooden furniture, ensuring high thematic relevance.

Participants were classified as consumers of premium furniture and selected through targeted sampling based on income level, design affinity, and sustainability orientation. As an inclusion criterion, respondents were required to own at least one high-value solid wood furniture item purchased within the last five years. Their responses enabled the statistical construction and empirical validation of eleven psychometric indices measuring multisensory engagement, craftsmanship perception, aesthetic coherence, material attachment, sustainability-value alignment, and symbolic self-identification, among others. The dataset provided sufficient statistical power ($n = 145$, $\alpha = 0.05$, CI 95%) for the reliable interpretation of affective, cognitive, and identity-related material perceptions. This granular approach allowed the model to capture subtle patterns of emotional resonance and decision-making within the premium consumption context.

The questionnaire was distributed via an online platform (Google Forms), allowing for efficient international reach. Responses were recorded using a five-point Likert scale (1 = not at all characteristic, 5 = fully characteristic), with whole-number responses only. Each item was aligned with dimensions introduced by the model, such as sensory perception, identity resonance, durability perception, moral satisfaction, aesthetic experience, and purchase intensity. The data collection aimed to generate responses with broad dispersion and interpretable trends, enabling statistical validation of the neuroperceptual model. Participant anonymity was ensured, and data handling complied fully with ethical research standards.

2.3 The applied model

This study introduces the *Perceptual Impact Model* (Figure 1) to investigate the process leading to purchase intention, with particular emphasis on the interplay between neuroaesthetics, multisensory perception, and identity-based evaluation. Structured in chronological phases, the model demonstrates how perceptions of a product's origin, quality, and sensory characteristics influence emotional engagement and purchasing desire. Six core values, sustainability, material and quality, durability, craftsmanship, art and design, and heritage, act as multidimensional perceptual fields that catalyse identity formation and affective experience. A summary of these stages, their perceptual components, and key diagnostic questions is presented in Table 1. These values are processed cognitively via sensory input, where affective responses (e.g. scent, texture, visual rhythm of wood) merge with memory and cultural representations (Bond et al., 2024). Multisensory stimuli such as tactile texture and visual cues have been shown to strongly influence perceived material quality and brand perception (Danielsson, 2025; Wang et al., 2025). The second level introduces perceived quality, shaped by the interaction between communicated promises and actual experiences. This aligns with predictive coding theory, where expectations shape

sensory interpretation; discrepancies affect perceived authenticity (Ji and Lin, 2022). At the third level, product identification occurs: the premium wooden object becomes integrated into the consumer's self-image, reflecting personal values, aesthetic sensibility, and social status (Kim and Heo, 2021). Wood's naturalness and visual uniqueness enable self-extension, echoing psychodynamic models of emotional attachment. The subsequent phase is emotional engagement, triggered by repeated positive experiences, especially when enhanced by craftsmanship, multisensory stimuli, and authentic storytelling. These activate neural reward systems (Ko, 2017; Spence, 2020) and are often reinforced by implicit memories of material durability and tactile familiarity (Harju and Lahinen, 2021).

In this context, emotional loyalty extends beyond brand allegiance to encompass deeper, identity-driven commitment, particularly among consumers aligned with slow design and sustainable lifestyles (Al Darwish, 2023). The model culminates in purchase desire, a cumulative outcome of the previous stages. Decision intensity increases when resonance between consumer and product occurs on aesthetic, ethical, and sensory levels (Kim and Heo, 2021). Thus, purchasing transcends economics, becoming an act of aesthetic self-expression, cultural identification, and multisensory investment.



Figure 1. The perceptual impact model

Table 1. Perceptual impact model – overview table

Components and layers	Significance	Source	Key questions
Heritage	The symbolic meanings of wood tied to collective cultural memory evoke identity-level evaluations.	Bond et al. (2024)	Through which neurosocial mechanisms does wood trigger associations with cultural heritage, and how does this affect long-term value perception?
Art and design	The aesthetic symmetry of design elicits visual dopamine responses and aids memory encoding.	Spence (2020)	To what extent do texture and formal proportions of wooden furniture influence aesthetic experience?
Craftsmanship	Enhances the sense of authenticity, strengthening affective attachment to the object.	Ko (2017)	What role do traces of manual work play in forming emotional bonds and sensory evaluations?
Durability	Durability perception relies on implicit memory of prior material experiences.	Harju - Lähtinen (2021)	How do tactile and visual impressions influence perceptions of material durability?
Material and quality	Wood's texture and colour activate instant quality expectations via multisensory input.	Daniels-son (2025)	How rapidly is wood's perceived quality detected in a multisensory context?
Sustainability values	The material conveys ethical and environmental values that contribute to identity formation.	Al Darwish (2023)	How are sustainability associations integrated into mechanisms of moral judgement?
Sensory experience	Touch, sight, and smell generate affective responses and preferences.	Wang et al. (2025)	How do wood's sensory stimuli affect perceptions of authenticity and aesthetic character?
Perceived quality	The alignment between marketing claims and real use shapes perceptions of quality authenticity.	Ji & Lin (2022)	How is the communicated quality integrated with the experienced quality?
Product identification	The furniture item, as self-extension, becomes a reflection of self-image and aesthetic values.	Kim & Heo (2021)	How do naturalness and originality contribute to self-representation?
Engagement	Repeated positive experiences foster loyalty and reinforcement.	Ko (2017)	How does emotional attachment affect memory traces related to wood?
Purchase desire	Emerges through cumulative perceptual effects when product values resonate with the individual.	Kim & Heo (2021)	What factors trigger motivational response patterns leading to purchase decisions?

2.4 Statistical methods and applied indices

The aim of the statistical procedures applied in this research was to map the psychological and emotional structures related to wood-based furniture products through complex response patterns. To achieve this, nine quantitative indices were developed, uniquely combining perceptual, affective, identity-based, and motivational responses. The calculation of the indices is based on simplified, transparent formulas, enabling both academic and industry use. These indices and their respective formulas are summarised in Table 2, along with their theoretical background and operational definitions.

Table 2. Perceptual indicators – detailed table

Indicator name	Calculation formula	Explanation	Description	Source
Material Identity Alignment Index	$MIAI = -\sum(P_i \cdot \ln(A_i))$	P_i : proportion of alignment with personal values; A_i : identity relevance of the given material	Degree of alignment between natural material and individual value systems	Kim & Heo (2021)
Perceived Craft Distinctiveness Index	$PCDI = \sum n_i(n_i - 1) / (N(N - 1))$	n_i : number perceiving craft details; N : total respondents	Detectability and distinctiveness of visible craftsmanship elements	Stern & Schwarzbauer (2013)
Emotional Sensory Load Index	$ESLI = (s - 1) / \ln(E)$	s : number of perceived sensory attributes; E : variance of emotional responses	Intensity of emotional reactions elicited by sensory experiences	Wang et al. (2025)
Sustainability-Value Integration Index	$SVII = \sum(S_i \cdot \ln(S_i)) / \ln(T)$	S_i : sustainability factor value; T : number of value preferences	Integration of sustainability into personal value systems	Al Darwish (2023)
Aesthetic Cognitive Activation Index	$ACAI = \sum(p_i \cdot \ln(p_i)) / \ln(n)$	p_i : frequency of design element perception; n : number of design elements	Aesthetic perception and cognitive engagement triggered by design	Spence (2020), De Luca & Termini (1972)
Perceptual Integrity Synchronisation Index	$PISI = \sum(C_i - T_i)^2 / n$	C_i : communicated quality; T_i : experienced quality	Discrepancy between communicated and experienced product quality	Ji & Lin (2022)
Identity Resonance Quotient	$IRQ = \sum(V_i \cdot \ln(V_i)) / \ln(s)$	V_i : identity dimension scores; s : number of identity factors	Resonance between product identity and consumer self-concept	Kim & Heo (2021)
Material Attachment Stability Index	$MASI = (A_t / T_t) \cdot \ln(R)$	A_t : current attachment; T_t : time-based stability; R : brand recognition	Temporal stability of material attachment and brand loyalty	Ko (2017)
Volitional Purchase Intensity Index	$VPII = \sum(P_i \cdot M_i)$	P_i : perceptual factor; M_i : motivational weight	Combined weight of perceptual and affective components in purchase decision	Kim & Heo (2021), Gibson (1979)

The eleven thematic questions and the nine developed perceptual indices are clearly interrelated, both in terms of content and methodology. Each question is underpinned by a specific psychological or neuroaesthetic dimension, which the respective index is designed to capture formulaically. Table 3 presents the most logically fitting pairings and briefly explains why each index is the most appropriate match.

Table 3. Thematic questions and assigned indices – summary table

	Thematic Question	Assigned Index	Justification
1.	Heritage	1. MIAI – Material Identity Alignment Index	Measures identity resonance and material associations based on alignment with personal values.
2.	Art and design	5. ACAI – Aesthetic Cognitive Activation Index	Captures neuroaesthetic activation through design using Shannon entropy weighting.
3.	Craftsmanship	2. PCDI – Perceived Craft Distinctiveness Index	Quantifies detectability and distinctiveness of hand-crafted details (Simpson-based).
4.	Durability	9. MASI – Material Attachment Stability Index	Reflects long-term material attachment and perceived durability via time-based ratios.
5.	Material and quality	7. PISI – Perceptual Integrity Synchronisation Index	Models coherence between communicated and experienced quality via predictive coding.
6.	Sustainability values	4. SVII – Sustainability-Value Integration Index	Measures how sustainability integrates into personal values (entropy ratio).
7.	Sensory experience	3. ESLI – Emotional Sensory Load Index	Captures intensity of emotional responses to multisensory stimuli (Margalef-based).
8.	Perceived quality	7. PISI – Perceptual Integrity Synchronisation Index	Again applies to match between perceived and communicated product quality.
9.	Product identity alignment	8. IRQ – Identity Resonance Quotient	Quantifies self-representation through naturalness and identity weighting.
10.	Commitment	9. MASI – Material Attachment Stability Index	Reflects long-term emotional and tactile attachment to wood.
11.	Purchase desire	10. VPPI – Volitional Purchase Intensity Index	Measures how perceptual and affective elements convert into purchase motivation.

3 Results and Discussion

Understanding wood's collective heritage meaning requires an interdisciplinary neurosocial approach. On a sensory level, wood's texture, scent, and colour create a multi-channel experience that elicits emotional and memory-based responses. Culturally, wood is often associated with tradition and craft heritage — particularly among premium product consumers, where material choice holds symbolic value (cf. Bourdieu's *habitus* (1984)). (Note: premium products are purchased across all social strata.) To quantify this, the classic MIAI index (combining value alignment (P) and identity relevance (A)) may be extended by a third heritage dimension (H), producing the following modified formula: $MIAI_h = -[0.6 \cdot P_{norm} + 0.4 \cdot H_{norm}] \cdot \ln(A_{norm})$. The specific questionnaire items used to operationalize this extended index are listed in Table 4.

Table 4. Measurement of heritage-related perceptions

Purpose	Question	Measurement
Value alignment	“To what extent does wood align with your personal values?”	P
Naturalness / authenticity	“To what extent do you feel that wood retains its original, natural quality even after processing?”	A
Collective memory / Tradition	“To what extent does wood remind you of home or cultural heritage?”	H
Purchase Justification	“Is it important to you that products carry a sense of heritage?”	Control
Perceived Timelessness	“To what extent do you consider wood a lasting and enduring value?”	Supplementary

Based on Likert-scale responses from 145 premium consumers, the calculated average value of the extended $MIAI_h$ index is approximately ≈ 0.17 , which corresponds to an identification level of $1 - 0.17 = 83\%$, indicating positive attachment to wood as a material. This high identification rate confirms that wood is an affective and symbolic material. This aligns with prior findings suggesting that material choices often serve identity expression (Grayson and Martinec, 2004; Miller, 2010). Wood's multisensory appeal and cultural embeddedness reinforce this bond (Plassmann et al., 2012), with premium consumers particularly sensitive to symbolic heritage as part of their self-image and social representation (Bourdieu, 1984). Brands and producers are encouraged to integrate authentic heritage storytelling to enhance emotional engagement and perceived product value.

The visual features of wood-based furniture – such as proportion, symmetry, and texture – have been proven to activate the brain's reward centres responsible for aesthetic evaluation (Sztuka et al., 2025). This cognitive activation generates emotional responses on one hand, and fundamentally influences material preference and attitudes towards design on the other. To quantify this phenomenon, the Aesthetic Cognitive Activation Index (ACAI) was developed, which is an information-theoretic, entropy-type indicator: $ACAI = \sum p_i \cdot \ln(p_i) / \ln(5)$ where p_a represents the relative frequency of each response point, and $n = 5$ denotes the number of scale points. The index measures the homogeneity, intensity, and mental

consistency of aesthetic response – the more responses are concentrated on a specific value (e.g. 4 or 5), the closer the ACAI moves towards 1.0. This index draws on Shannon Entropy principles to measure perceptual consistency and mental engagement. As entropy-based metrics have proven valuable in quantifying uncertainty and variability in cognitive and social domains (Krippendorff, 2019; De Luca and Termini, 1972), their application here offers a robust means of translating subjective aesthetic responses into analytically tractable data. Based on four Likert-scale questions (proportion, symmetry, texture experience, general aesthetic impression) posed to the participants, the aggregated ACAI score was -0.7921 , indicating a high level of cognitive-aesthetic identification, indicates high aesthetic coherence and affective engagement, supporting theories that visual aesthetics activate the dopaminergic reward system (Chatterjee and Vartanian, 2016). This underscores the value of purposeful visual design in enhancing product appeal and influencing decision-making. Emphasising these features in brand communication may reinforce long-term material preference. Wood as a material can evoke cultural, sensory, and emotional depth. In the third phase of the research, the perception of craftsmanship and its relationship to object intimacy is presented using the Perceived Craft Distinctiveness Index (PCDI). The four questions used in the study are shown in the Table 5.

Table 5. Perceived craft distinctiveness: item-level breakdown

Dimension	Question	PCDI Score
Q1 – Perceived uniqueness	<i>To what extent does the given wood-based object appear unique or unrepeatable to you?</i>	0.7742 (~77%)
Q2 – Valuing imperfection and naturalness	<i>How valuable do you find small flaws or irregularities that indicate the natural quality of handcrafting?</i>	0.7842 (~78%)
Q3 – Visibility of craftsmanship traces	<i>To what extent are signs of handwork (e.g. carving, joints, surface irregularities) noticeable to you on the object?</i>	0.8792 (~87%)
Q4 – Felt intimacy with the object	<i>To what extent does the handcrafted nature of the wood-based object create a sense of personal connection or intimacy?</i>	0.8646 (~86%)

PCDI findings reveal that handcrafted features play a vital role in emotional attachment. Consumers readily recognise uniqueness, natural imperfections, and traces of manual labour—elements that foster a sense of intimacy and enhance perceived authenticity. These outcomes mirror prior research on the emotional and symbolic value of craft (Dormer, 1997; Csikszentmihalyi and Rochberg-Halton, 1981; Pine and Gilmore, 2007). In both design and marketing, making visible such features, rather than hiding them, can enhance product loyalty. Communicating the maker's role and the object's uniqueness supports emotional value creation.

Emotional attachment to natural materials, especially wood, and perceived durability are key decision-making factors. Step 4 examined this via the Material Attachment Stability Index (MASI), a three-dimensional metric capturing attachment based on current emotional bond (A_t), temporal stability (T_t), and brand recognition or trust (R). A_t and T_t were measured on 1–5 scales; R was log-transformed ($R > 1$; $R = 1$ adjusted to 1.1). For the 145 respondents,

mean values were: $A_t = 4.103$; $T_t = 4.268$; $R = 3.754$, resulting in an average MASI score of 1.273—indicating stable, moderately strong attachment and high perceived durability. These findings confirm that attachment to wood is grounded in durability and emotional reliability, shaped by prior experiences and cultural-sensory attributes. They align with long-term consumer-brand relationship models, where material attachment drives loyalty and ecological responsibility (Schifferstein and Zwartkruis-Pelgrim, 2008). Messaging that highlights longevity, reliability, and intergenerational use may deepen consumer trust and identification. The fifth phase introduced the Perceptual Integrity Synchronisation Index (PISI), assessing alignment between communicated (C_i) and experienced (T_i) quality. It identifies sensory or perceptual dissonance (neuroperceptual conflict) when visually conveyed cues (e.g., in advertising or store displays) differ from tactile, olfactory, or auditory experiences. PISI uses squared deviation to quantify consistency; lower values indicate higher perceptual integrity, i.e., when experience meets expectations. While the index could be decomposed further, the present study focused on the basic model, as shown in the Table 6.

Table 6. PISI – Input dimensions and variables

Dimension	Variable	Question	Note
Communicated quality	C_i	<i>"To what extent does the wood-based furniture appear to convey premium quality at first glance?"</i>	Visual and expected quality
Experienced quality	T_i	<i>"To what extent did you experience premium quality when physically engaging with the wooden furniture over time?"</i>	Actual multisensory experience

The average PISI value measured in the sample was 0.2897, indicating strong, though not complete, synchrony between visually conveyed and actually experienced quality. Some minor dissonance remains, which is particularly relevant in the premium segment, where expectations are strongly shaped by visual cues. If the sensory reality (e.g., overly uniform or processed wood) fails to meet these expectations, brand credibility suffers. As predictive coding theory suggests (Clark, 2013), unmet expectations may trigger cognitive dissonance and reduce preference. Hence, aligning visual and tactile qualities is a key strategic priority. Step six investigates the embeddedness of sustainability values and moral decision-making. The Sustainability-Value Integration Index (SVII) assesses how participants perceive wood's sustainability, and the extent to which they internalise it as a core moral value—specifically, how closely sustainability experience aligns with personal value preferences. The seventh table outlines the corresponding research questions.

The more values respondents associate with wood, the higher the level of sustainability-value integration. The SVII (Sustainability-Value Integration Index) captures four key dimensions: subjective perception of wood's sustainability (S_1), ethical judgement (S_2), moral satisfaction (S_3), and adherence to social norms (S_4). It also includes variable T , denoting the number of values linked to wood. A higher T lowers the divisor, raising the index. In this study, the mean SVII was 18.3776, indicating a high degree of internalised moral-sustainability alignment among premium consumers. Wood is seen not just as eco-friendly, but ethically significant. Storytelling around origin, regeneration, and transparent life-cycle practices may enhance moral satisfaction and reinforce normative motivations.

Table 7. SVII: measurement of sustainability-value integration index

Dimension	Variable	Question
Sustainability Sensitivity	S1	"To what extent do you consider wood capable of balancing human needs with environmental limits compared to other materials?"
Ethical conviction	S2	"Do you consider it important to choose environmentally friendly materials from an ethical point of view?"
Satisfaction with moral choice	S3	"Is it important to you to select materials during purchase whose production does not require excessive environmental intervention?"
Group norm Compliance	S4	"To what extent do you perceive that environmental considerations play a real role in material choices within your social environment?"
Value Dimension	Variable	Question
Number of value preferences	T	"Which values do you feel are strongly connected to wood as a base material?"

The seventh phase focused on the sensory experience of wood—scent, texture, grain—shaping emotional identification and perceived quality. The ESLI (Emotional Sensory Load Index) measures both the number of sensory dimensions perceived and emotional coherence. A greater number of sensory inputs, coupled with low variance in emotional response, yields a lower (negative) ESLI score. The average ESLI of -5.9196 suggests high multisensory emotional synchronisation with wood. Participants consistently reported positive emotional associations across touch, scent, and visual stimuli. Low emotional variance indicates authenticity and alignment—critical in premium experiences. Natural textures and minor irregularities should be embraced as intentional emotional cues, not flaws.

In the eighth stage, the PISI (Perceptual Integrity Synchronisation Index) assessed the match between communicated and experienced quality. Predictive coding theory posits the brain compares sensory input with expectations. A low PISI signals harmony. The mean PISI here was 0.3103 , reflecting moderate synchrony but room for improvement. Marketing visuals promised high-quality material, yet sensory experience occasionally fell short, causing minor perceptual dissonance. These findings underscore the importance of aligning visual, tactile, and narrative brand elements across channels (Clark, 2013).

The ninth phase analysed the alignment between personal identity and perceived naturalness of wood using the IRQ (Identity Resonance Quotient). Grounded in identity resonance and self-representation theories, this metric evaluates self-identification, uniqueness, aesthetic sensitivity, and identity coherence. With an average IRQ of 16.9913 , results indicate that wood serves not only functional but symbolic, identity-relevant roles. According to resonance theory (Kirmani, 2009), people gravitate toward objects that affirm self-concept. Material choices become expressions of personal style, values, and social roles. Emphasising authenticity and uniqueness enhances emotional connection—especially in creative sectors where individuality drives preference.

The tenth stage used MASI (Material Attachment Stability Index) to assess material attachment and brand loyalty. MASI comprises three components: current emotional attachment (A_t), temporal consistency (T_t), and brand reliability (R). In this study, mean

values were $A_t = 4.103$, $T_t = 4.268$, $R = 3.754$, resulting in a MASI score of 1.6168. This suggests strong, stable consumer loyalty tied to positive sensory and emotional experiences. Early impressions—particularly tactile and visual—contribute to emotional learning and long-term brand preference. Strategic communication can reinforce this by recalling positive material memories.

The final phase integrated these insights using the VPPI (Volitional Purchase Intensity Index), which weighs aesthetic and moral motivations. The strongest drivers were initial aesthetic impression (P_1) and perceived naturalness (P_2), which built credibility and trust. Ethical commitment (M_1), especially sustainability, deepened engagement, while self-relevance (M_2) supported emotional alignment. With a calculated VPPI of 33.6812, findings confirm that purchase intent in the premium wood segment stems not from impulsive factors but from an integration of aesthetic, ethical, and identity dimensions. Multi-layered communication strategies that align these layers can enhance consumer engagement and strengthen market positioning.

4. Conclusion

This study examined how perceptual and affective factors shape value formation and decision-making in the context of premium wood-based furniture. Through the development and application of the Perceptual Impact Model and nine psychometric indices, the research revealed a structured process by which sensory, emotional, and identity-related components influence consumer motivations. The model traces how sequential stages, from perception to commitment, are shaped, reinforced, and integrated into purchase intention.

- Consumer attachment to wood is not the result of isolated impressions but of a cohesive interplay between sensory coherence, emotional resonance, cultural symbolism, and identity alignment. The findings show that wood is perceived not merely as a functional or sustainable material, but as a symbolic medium that evokes craftsmanship, aesthetic meaning, and heritage. This multidimensional engagement fosters emotional bonding and strengthens long-term commitment. Beyond validating the model, the sample also revealed meaningful intra-segment variations within the premium consumer group. Most notably, participants with elevated aesthetic sensitivity demonstrated a significantly higher Identity Resonance Quotient (IRQ = +41%, $p < 0.01$), indicating that aesthetic perception not only shapes surface-level preferences but actively mediates the alignment between material attributes and self-concept. This underscores the strategic relevance of aesthetic coherence in premium design: when visual proportion and texture achieve cognitive resonance, they amplify the symbolic function of wood, deepening both personal meaning and brand attachment. Additionally, participants with professional design backgrounds ($n = 41$) showed a markedly higher average IRQ score (21.44 vs. 14.76; $p < 0.05$), suggesting a stronger symbolic identification with the material. These findings indicate that this segment is far from monolithic; rather, it is differentiated into value-driven micro-groups. Recognising these perceptual subtypes offers new opportunities for more targeted design strategies and refined brand positioning.
- The model thus proves valuable both as a diagnostic tool and as a conceptual framework, fulfilling the research aim by identifying and quantifying the drivers of material attachment in wood-related consumption. Within the broader doctoral project, these findings contribute significantly to understanding hybrid identity-building, quality communication, and sensory value positioning in design and

branding. Translating material meaning into measurable insights through interdisciplinary metrics, the study supports the dissertation's goal of embedding consumer perception into design-led value creation. It also affirms the central hypothesis: that wood, as a multisensory and symbolic material, holds strategic potential for emotional branding and differentiation in sustainable creative industries.

- The results yield several practical implications. In product development, deliberately emphasising visual rhythm, tactile textures, and even natural "imperfections" can enhance authenticity and emotional engagement. In branding, communicating craftsmanship, sustainability, and heritage through narrative can strengthen identity-driven motivation. In supply chains, local production and transparency support both ecological and cultural value. At the policy level, the findings argue for clearer labelling and procurement frameworks that reflect the emotional and symbolic significance of natural materials like wood.
- Future research should explore several directions. Longitudinal studies may examine how attachment and brand loyalty evolve over time, especially using MASI. A/B testing in design contexts could determine causal links between features like craftsmanship or texture and consumer preference (e.g., via PCDI and ACAI). Cross-cultural comparisons may reveal perceptual asymmetries across markets. Neurometric or physiological validation (e.g., ESLI, VPPI) could further illuminate affective mechanisms. Finally, perceived mismatches between expected and experienced product quality, particularly in digital environments, merit closer study in light of their growing relevance.
- By integrating cognitive, cultural, and emotional dimensions, the proposed model offers a robust framework for understanding the role of wood in consumer decision-making. It enables more systematic interpretation of material perception and supports emotionally resonant, identity-aligned innovation in sustainable design.

Acknowledgement

The author gratefully acknowledges the members of the design and innovation research network for their methodological feedback and collaborative support throughout the study. Special appreciation is extended for the interdisciplinary and international insights that deepened the research's theoretical and empirical foundations. Sincere thanks are due to Prof. Dr. József Zalavari for his supervision, guidance, and support during the doctoral project.

Author Contributions

Andrea Reményi: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Funding acquisition, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Software, Supervision, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review and editing.

Conflict of interest statement

The authors declare no conflict of interest.

References

- Al Darwish, L., (2023). Green furniture: Sustainability, consumer choice, and market analysis in an evolving landscape, Ontario College of Art and Design University. <https://openresearch.ocadu.ca/id/eprint/4071>, Last access: 21.08.2025.
- Bond, J., Parker, M., and Spennemann, D.H.R., (2024). Sensory perception in cultural studies; a review of sensorial and multisensorial heritage, *The Senses and Society*, 19(2), 233–251, DOI: [10.1080/17458927.2023.2284532](https://doi.org/10.1080/17458927.2023.2284532)

- Bourdieu, P., (1984). *Distinction: A social critique of the judgement of taste*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Chatterjee, A., and Vartanian, O., (2016). Neuroscience of aesthetics, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1369(1), 172–194, DOI: [10.1111/nyas.13035](https://doi.org/10.1111/nyas.13035)
- Clark, A., (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science, *Behavioral and Brain Sciences*, 36(3), 181–204, DOI: [10.1017/S0140525X12000477](https://doi.org/10.1017/S0140525X12000477)
- Csikszentmihalyi, M., and Rochberg-Halton, E., (1981). *The meaning of things: Domestic symbols and the self*, Cambridge University Press, DOI: [10.1017/CBO9781139167611](https://doi.org/10.1017/CBO9781139167611)
- Danielsson, P., (2025). The role of multi-sensory marketing in shaping consumers' brand perceptions, Aalto University. <https://aaltodoc.aalto.fi/items/6966a6c8-6851-4cbd-b161-31904b08ee69>, Last access: 09.09.2025.
- De Luca, A., and Termini, S., (1972). A definition of a nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy set theory. *Information and Control*, 20(4), 301–312, DOI: [10.1016/S0019-9958\(72\)90199-4](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(72)90199-4)
- Dharsono, W.W., (2025). Visual and emotional connections in wooden product design: A comprehensive review of neuro-architecture principles, *Journal of Artificial Intelligence in Architecture*, 4(1), DOI: [10.24002/jarina.v4i1.10160](https://doi.org/10.24002/jarina.v4i1.10160)
- Dormer, P., (1997). *The culture of craft: Status and future*, Manchester University Press.
- Earnshaw, R., (2017). *Art, design and technology: Collaboration and implementation*, Springer, DOI: [10.1007/978-3-319-58121-7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58121-7)
- Gibson, J.J., (1979). *The ecological approach to visual perception*, Houghton Mifflin, Boston (reprint: Psychology Press, 2015). <https://psycnet.apa.org/record/2003-00063-000>, Last access: 09.09.2025.
- Grayson, K., and Martinec, R., (2004). Consumer perceptions of iconicity and indexicality and their influence on assessments of authentic market offerings, *Journal of Consumer Research*, 31(2), 296–312, DOI: [10.1086/422109](https://doi.org/10.1086/422109)
- Harju, C., and Lähtinen, K., (2021). Perceptions of wooden interior product quality — insights on sustainability views among Finnish consumers, *Natural Resources Institute Finland*. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/551249/Harju_et_al_2021.pdf, Last access: 20.09.2025.
- Hosey, L., (2012). *The shape of green: Aesthetics, ecology, and design*, Island Press, Washington, DC.
- Ji, S., and Lin, P., (2022). Aesthetics of sustainability: Research on the design strategies for emotionally durable visual communication design, *Sustainability*, 14(8), 4649, DOI: [10.3390/su14084649](https://doi.org/10.3390/su14084649)
- Karana, E., Barati, B., Rognoli, V., and van der Laan, A.Z., (2015). Material driven design (MDD): A method to design for material experiences, *International Journal of Design*, 9(2), 35–54.
- Kim, J., and Heo, W., (2021). Interior design with consumers' perception about art, brand image, and sustainability, *Sustainability*, 13(8), 4557, DOI: [10.3390/su13084557](https://doi.org/10.3390/su13084557)

- Kirmani, A., (2009). The self and the brand, *Journal of Consumer Psychology*, 19(3), 271–275, DOI: [10.1016/j.jcps.2009.05.011](https://doi.org/10.1016/j.jcps.2009.05.011)
- Ko, K.K.H., (2017). *Understanding the role of product attachment with a view to enabling sustainable consumption: A study of household furniture*, PhD Dissertation, University of New South Wales (UNSW). <https://unsworks.unsw.edu.au/bitstreams/0bfe834d-0a6f-4161-8b4b-239c0424c5f4/download>, Last access: 25.09.2025.
- Krippendorff, K., (2019). *Content Analysis: An Introduction to Its Methodology* (4th ed.). Sage Publications. DOI: [10.4135/9781071878781](https://doi.org/10.4135/9781071878781)
- Manna, R., (2025). *Do we need “new”? Rethinking trends through emotional connections, sustainable design, and cultural heritage*, Master’s Thesis, OCAD University. <https://openresearch.ocadu.ca/id/eprint/4765>, Last access: 22.09.2025.
- Manu, T., Nazmi, A.R., Shahri, B., and Emerson, N., (2022). Biocomposites: A review of materials and perception, *Materials Today Communications*, 31, 103308, DOI: [10.1016/j.mtcomm.2022.103308](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103308)
- Miller, D., (2010). *Stuff*, Polity Press, Cambridge.
- Pedgley, O., Rognoli, V., and Karana, E., (2016). Materials experience as a foundation for materials and design education, *International Journal of Technology and Design Education*, 26(4), 613–630, DOI: [10.1007/s10798-015-9327-y](https://doi.org/10.1007/s10798-015-9327-y)
- Pine, B.J., and Gilmore, J.H., (2007). *Authenticity: What consumers really want*, Harvard Business Review Press, Boston.
- Plassmann, H., Ramsøy, T.Z., and Milosavljevic, M., (2012). Branding the brain: A critical review and outlook, *Journal of Consumer Psychology*, 22(1), 18–36, DOI: [10.1016/j.jcps.2011.11.010](https://doi.org/10.1016/j.jcps.2011.11.010)
- Schifferstein, H.N.J., and Zwartkruis-Pelgrim, E.P.H., (2008). Consumer-product attachment: Measurement and design implications, *International Journal of Design*, 2(3), 1–13. <http://www.ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/325/205>, Last access: 14.09.2025.
- Spence, C., (2020). Senses of place: Architectural design for the multisensory mind, *Cognitive Research: Principles and Implications*, 5(1), 40, DOI: [10.1186/s41235-020-00243-4](https://doi.org/10.1186/s41235-020-00243-4)
- Stern, T., and Schwarzbauer, P., (2013). Consumer behavior towards eco-friendly products: Wood products certification, consumer behavior and its climate policy potential, *International Conference on Resource Efficiency in Interorganizational Networks*, 13–14 November 2013, Graz, Austria. DOI: [10.13140/2.1.3364.2243](https://doi.org/10.13140/2.1.3364.2243)
- Sztuka, I.M., Becker, M., and Kühn, S., (2025). Neural representations underlying psychological responses to natural and artificial features in indoor architecture, *Journal of Environmental Psychology*, 103, 102553, DOI: [10.1016/j.jenvp.2025.102553](https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2025.102553)
- Thakral, P.P., Moo, L.R., and Slotnick, S.D., (2012). A neural mechanism for aesthetic experience, *NeuroReport*, 23(5), 310–313, DOI: [10.1097/WNR.0b013e328351759f](https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e328351759f)
- Wang, B., An, S., and Li, K., (2025). Shaping green choices: How sensory cues drive behavior of wood-plastic composites, *Behavioral Sciences*, 15(3), 383, DOI: [10.3390/bs15030383](https://doi.org/10.3390/bs15030383)



Hybrid making in furniture design education: bridging digital fabrication and craft through experiential learning

Hande Atmaca*^{ID}

ABSTRACT: This paper analyzes a hybrid furniture design studio through the lenses of design pedagogy and experiential learning, investigating how hybrid making can integrate digital fabrication with craft-based practices while supporting thinking through making. Although digital fabrication has gained prominence in design education, empirical research on how digital and craft-based practices can be integrated within a coherent pedagogical framework for furniture design remains limited, indicating a clear research gap. To address this, the study adopts a qualitative case-study methodology, combining studio observations, students' written and verbal feedback, process documentation, and photographic records. A focused literature review on design education and hybrid making informed three guiding themes: material engagement, critical thinking, and creative discovery. The study contributes an empirically grounded pedagogical framework for hybrid furniture design education, demonstrating how digital modelling and printing, laser cutting, ceramic slip casting, and woodworking can support materially engaged experiential learning. Findings indicate that hybrid workflows enhance creativity and critical thinking while deepening students' material literacy. Students directly encountered the physical properties of materials, production constraints, and occasional unpredictability as part of an iterative, hands-on learning process that bridges digital and craft-based methods.

Keywords: hybrid design, craft, digital fabrication, furniture design education

Mobilya tasarımı eğitiminde hibrit yapım: dijital üretim ile zanaat arasında köprü kurmak

ÖZ: Bu makale, hibrit bir mobilya tasarım stüdyosunu tasarım pedagojisi ve deneyimsel öğrenme açısından inceleyerek hibrit üretimin dijital fabrikasyon ile zanaatı nasıl bir araya getirebileceğini ve “yaparak düşünme” yaklaşımını nasıl desteklediğini araştırmaktadır. Dijital üretim tasarım eğitiminde önem kazanmış olsa da, dijital ve zanaat temelli süreçlerin mobilya tasarımına yönelik tutarlı bir pedagojik çerçevede nasıl bütünleştirilebileceğine ilişkin ampirik çalışmalar sınırlıdır ve bu durum belirgin bir araştırma boşluğuna işaret etmektedir. Bu boşluğu ele almak amacıyla çalışma, stüdyo gözlemleri, öğrencilerin yazılı ve sözlü geri bildirimleri, süreç dokümantasyonu ve fotoğraf kayıtlarını bir araya getiren nitel bir durum çalışması yöntemi benimsemektedir. Tasarım eğitimi ve hibrit üretim literatürüne dayalı odaklı bir inceleme, üç temel temayı belirlemiştir: malzeme ile etkileşim, eleştirel düşünme ve yaratıcı keşif. Çalışma, dijital modelleme ve baskı, lazer kesim, seramik döküm ve ahşap işçiliğinin malzemeye etkileşime dayalı deneyimsel öğrenmeyi nasıl destekleyebileceğini gösteren ampirik temelli bir pedagojik çerçeve sunmaktadır. Bulgular, hibrit iş akışlarının yaratıcılığı ve eleştirel düşünmeyi geliştirdiğini, öğrencilerin malzeme okuryazarlığını derinleştirdiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: hibrit tasarım, zanaat, dijital fabrikasyon; mobilya tasarım eğitimi

1 Introduction

In recent decades, design education has been shaped largely by digital fabrication technologies, which prioritise efficiency, perfection, and precision, supporting design's capacity for mass production. Without dismissing the ways these advances have expanded studio teaching, they simultaneously raise critical pedagogical questions—when, how and why such developments should be part of the curriculum, and the learning outcomes desired with these technologies. Cheatham (2017) foresees the risk of falling into the trap of being formalist, as without a concrete base of intellectual, societal and humane dimensions, holistic understanding of a studio culture would be impossible to diffuse.

Critical debates advocate a shift from product-oriented to process-oriented teaching and learning, centred on holistic approaches (Cheatham, 2017), experimentation and material engagement with the hand as a core to design learning (Rowe, 2024). Design itself is iterative and exploratory by nature, and, for this, pedagogical approaches should question complete digitisation since it omits the natural loop of problem framing such as prototyping and testing; which are crucial for students to engage fully with the material themselves (Soomro et al., 2021). Design problems should be addressed by teaching a complete set of skills in education that definitely benefits from technology (Kahraman et al, 2024, Nasir et al, 2022); yet, digital modelling and fabrication can complement craft-based practices—not by erasing the tacit knowledge of craft-based labour (Boza, 2016), but by expanding its expressive and explanatory scope.

Hybrid making could be simplified as the embodiment of digital means with intuition (Bernabei and Power, 2018)—tactile senses meeting precision, thus constituting a 'pedagogical bridge' where expansion with technology is possible without the exclusion of the material senses and production skills. McCullough (2005) asserts that "digital fabrication improves tangible speculation", reaffirming making as both a reflective and cognitive process. Similarly, Ingold states that the concept of material agency situates making as a "dialogue with matter", a space of exploration through engaging with the material, but not its simulation (2012). As Leatherbarrow theorizes as the "skin of architecture"—surfaces act as boundaries of the maker and the user, they are interfaces that carry irregularities and traces of this dialogue and digital tools can act as reflective partners in making, enhancing rather than diminishing material awareness (2009). Additionally, digital tools can be used to support craft-based practices in the search for new and unexpected forms, as they are capable of generating structures that extend beyond the capacities of the human hand (Zoran, 2013).

In this study, the term *craft* is understood not merely as traditional handwork but as a form of embodied, material knowledge rooted in tacit skills, sensory engagement, and reflective interaction with matter. This definition aligns with Ingold's (2013) view of making as a material dialogue and with McCullough's (2005) framing of craft as a cognitive, exploratory practice—an understanding that allows craft to interface productively with digital fabrication within hybrid learning environments.

From a design education perspective, by asking the important questions of "how things are produced" and "how materials behave", students develop material and process literacy—that cannot be experienced solely by technological means. On the other hand, such tactile dialogue opens up possibilities, away from predetermined geometries, expanding creativity grounded in reflective observation, trial, and analysis.

However, looking at the existing body of scholarly work, very limited studies have tackled engagements of craft and digital fabrication (Ingold, 2013; McCullough, 2005; Zoran, 2013;

Zoran and Buechley, 2013), and these do not provide roadmaps for design education. Research on FabLabs and digital studios (Georgiev and Nanjappan, 2023; Soomro et al., 2021) has examined sustainability and collaborative work, but has not articulated a methodology that integrates digital and craft-based practices into a pedagogical framework that could be beneficial for design education. The interpretation of key theoretical positions and their translation into these three pedagogical dimensions are systematically outlined in Table 1.

Table 1. Interpretation of the Literature Underpinning the Hybrid Making Framework

Literature Focus	Key References	Concepts Extracted from the Literature	Framework Dimension
Material Engagement & Thinking Through Making	Frascara (2017); McCullough (1996); Ingold (2013)	Material Engagement & Enactive Making	Material Engagement
Hybrid Making & Digital Craft Integration	Zoran (2013); Zoran & Buechley (2013); McCullough (2005)	Hybrid craft; digital tools as mediators	Creative Discovery
Ceramic Processes and Material Uncertainty	Malafouris (2023); Pek et al. (2022)	Unpredictability; learning through error and material contingency	Creative Discovery
Experiential Learning & Iterative Design Pedagogy	McCullough (2005); Rowe (2024); Cheatham (2017)	Iteration; reflection-in-action; process-oriented learning trajectories	Critical Thinking

Furthermore, there remains an insufficiency of knowledge specifically within furniture design education for establishing a framework that encourages a multi-faceted design approach. The majority of research in furniture design that deals with technology focuses on the automation of CNC technologies or flat-pack production (Kılıç, 2016; Mujir et al., 2018, Yan et al., 2023). On the other hand, this study also underlines a new trajectory: the integration of ceramics within furniture education. While 3D printing is an emerging field (Zhang and Wei, 2024), research remains largely confined to small-scale or entirely digital forms in ceramic production. Previous works of artists have made use of 3D printing in ceramics for different surface finishes, and their claims also justify the aim of this work, as their approach has consistently treated these technologies as intermediate tools rather than final products (Zoran, 2013, p. 392). This perspective positions hybrid making as a productive space in which digital processes and ceramic practices can be combined to expand material engagement within furniture design education.

For this reason, this study focuses on a third-year elective furniture design studio with 18 students (Construction and Details in Furniture Design), centred on hybrid making that explicitly questions the gap between digital fabrication and craft-based practices in furniture design education. While previous research in furniture design has explored FabLabs and CNC-based production, empirical accounts of studios that integrate digital fabrication and woodworking practices together with a secondary material such as ceramics within a coherent pedagogical framework remain limited and therefore represent a distinctive contribution.

The aim of the study is to offer a hybrid furniture design education framework that specifically combines 3D modelling and printing, laser cutting, ceramic slip casting and manual ceramic production with woodworking to support experiential “thinking through making” (Ingold, 2012). To achieve this, a thorough literature review on design education, ceramic fabrication and hybrid making was conducted to examine the contributions of hybrid design methods, and from this review three key themes were identified that served as a roadmap: material engagement (McCullough, 1996; Ingold, 2013), critical thinking (McCullough, 2005; Cheatham, 2017; Rowe, 2024), and the encouragement of creative discovery (Zoran, 2013; Malafouris, 2023).

2 Method

2.1 Research design and context

The research is based on a third-year elective furniture design studio (One semester-15 weeks) offered to students from the Departments of Interior Architecture and Environmental Design and Industrial Design in the Faculty of Fine Arts and Design. The studio was conducted in a Maker Lab environment that combines a Woodworking Workshop, a Ceramics Workshop, and a Digital Fabrication Workshop. Students had been previously introduced to these facilities in earlier years, which allowed the course to build on existing technical familiarity and focus on deeper material and process-oriented learning.

The course was structured around three main standing points, to analyse and foster *material literacy*, *critical thinking*, and *creative discovery*, in students and learning objectives were also organized in a way to foster these three main themes derived from the literature review. The first objective was to encourage students to explore the potential and limitations of specific materials and construction techniques, by immersing them in a range of analogue and digital tools. The course utilised prototyping as “interactive systems central to design thinking” (Georgiev and Nanjappan, 2023), to highlight the integration of digital means as critical mediators, bridging the gap between idea and product. This process-oriented structure follows an iterative digital–craft learning cycle, illustrated schematically in Fig. 1.

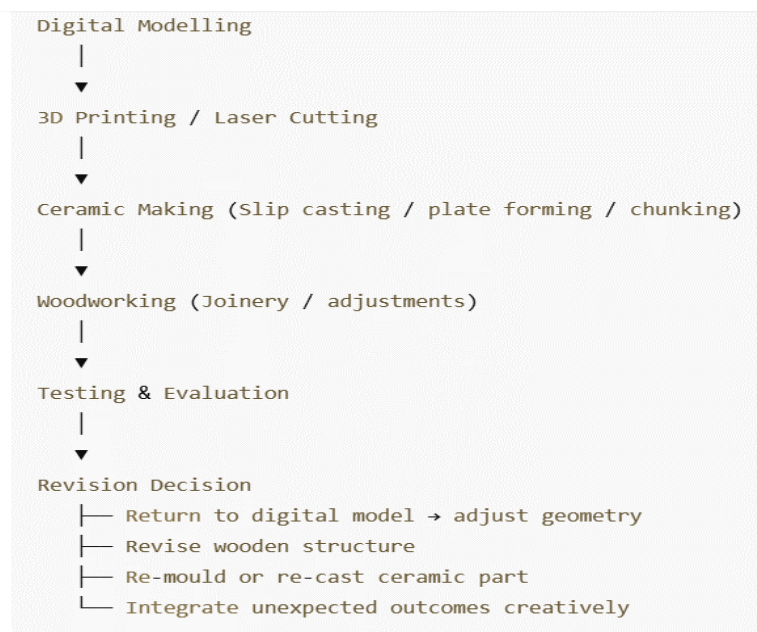


Figure 1. Iterative Digital–Craft Learning Cycle

Secondly, students were encouraged not only to acquire technical competence, but also to cultivate a deeper knowledge based on design and production in order to increase their capacity for critical reflection. In line with this understanding, the course prioritised iterative processes of starting over and discovery rather than a meticulous finished form. As shown in Fig. 1, iteration was positioned as a core learning mechanism connecting digital modelling, material experimentation, and revision. Accordingly, assessment in design education should focus not solely on final products but also on the learning trajectory and the critical reflection that accompanies it (Rowe, 2024), supporting students in becoming ‘self-learners’ of material constraints and possibilities, structural requirements and solutions, and designerly ways of problem-solving (Soomro et al., 2022).

Lastly, many scholarly works address how hybrid making can fortify new and previously unexplored forms due to the nature of 3D printing (Zoran, 2013; Zoran and Buechley, 2013). These forms can take shape in unprecedented ways that the human hand has never produced. They may also lead to creative and unexpected discoveries when blended with different materials; for example, ceramic slip casting over 3D-printed materials can introduce a new trajectory for engaging with material behaviour. For this reason, it was also important to analyze how students responded to such emerging possibilities and how they interpreted these discoveries within the design process.

Additionally, ceramic artists and designers (Prof. Sevim Çizer and Ayda Eriş) were blended into the teaching process to fortify the hybrid nature of the course structure and to expand students’ exposure to expert craft knowledge and situated forms of material practice.

Table 2 clarifies the relationship between the study’s research questions, qualitative data sources, and analytical strategies, enhancing methodological transparency.

Table 2. Alignment of Research Questions and Methodological Tools

Research Question	Relevant Data Source(s)	Analytical Approach
How do students develop material literacy?	Observations, reflections, ceramic/wood prototypes	Thematic coding (Material Engagement)
How does iterative making shape critical thinking?	Verbal feedback, revision logs, process documentation	Iteration analysis (Trial–Error–Revision)
How do students respond to unexpected outcomes?	Photographs, design revisions, critiques	Narrative reconstruction (Creative Discovery)
How does hybrid workflow affect design decisions?	All data sources	Cross-case synthesis

2.2 Data collection and analysis

Methodologically, qualitative observations, documentation of the process, and analysis of student reflections and work processes were utilized to understand how these three themes manifested specifically within the context of a furniture design studio and to determine students’ responses and pedagogical impact.

To capture the cognitive, affective, and material dimensions of students’ learning experiences, multiple qualitative data sources were employed. Studio observations were carried out throughout the semester, with the instructor documenting students’ decision-

making processes, problem-solving strategies, and interactions with materials and tools. Students' verbal feedback was collected at key stages of the project to trace how their understanding of material behaviour and hybrid workflows evolved over time. Process documentation—including sketches, digital models, intermediate prototypes, and photographic records of each stage—provided additional evidence of how ideas were translated across digital and craft-based media. Photographs of the studio environment and student work were used solely for research and documentation purposes, and all images were anonymised in accordance with ethical principles. An overview of the qualitative data sources and their respective roles within the methodological framework is provided in Table 3.

Table 3. Data Sources and Their Contribution to the Methodological Framework

Data Source	Description	Purpose in Study
Studio Observations	Weekly observation notes of student activities	Track material engagement, decision-making, hybrid workflow behaviour
Verbal Feedback	In-studio critiques and discussions	Capture spontaneous insights, peer learning, and iterative reasoning
Process Documentation	Sketches, 3D models, prototypes, moulds, firing records	Trace evolution of ideas across digital–craft processes
Photographic Records	Process and product visuals	Provide visual evidence of hybrid workflow

2.3 Materials, facilities and course task

Students were asked to design a small coffee table, measuring 50 × 50 × 50 cm in size composed of a wooden structure in pine with a circular or rectangular top in ceramic. This scale was chosen intentionally to encourage students to consider questions of joinery, stability and the interplay of materials within the timeframe of a semester.

The course unfolded across three overlapping phases:

- Digital Fabrication – Conceptual design, 3D modelling and printing, and laser-cut production
- Craft-based Fabrication (Ceramic and Wood): Mould-making, casting, firing, sanding and surface finishing. Preparations of wooden parts, cutting and assembling, sanding and surface finishing.
- Product Testing and Evaluation – Assessing stability, ceramic and wood profile coherence.

The aforementioned stages were introduced to the students, who were then tasked with choosing their own method in an iterative manner. The three main stages – drawing, modelling and making – were created and employed in a cyclical loop. This iterative process became an interplay between precision and the trial and error of material behaviour, fostering the core learning outcomes.

Students discovered that, unlike wood, ceramics resist complete prediction: moulds cracked, slip-cast pieces warped and fired dimensions diverged from digital models. Each instance of error became an opportunity for critical reflection, resulting in design revisions

and re-evaluation of the structure, the way in which the wood meets the ceramic top and its weight-bearing tolerance.

This structured yet flexible approach encouraged students to perceive digital tools as instruments for exploration rather than as the final production endpoint. Failure and adaptations/revisions were reframed as essential learning experiences, aligning with Ingold's (2013) notion of thinking through making. The project's load-bearing requirements and cross-material dependencies further deepened awareness of performance and craft precision. Meanwhile, shrinkage and deformation imposed authentic constraints that demanded creative adaptation.

2.4 Course Structure and Hybrid Workflow

The course employed a studio-based Maker Lab, composed of a Woodworking Workshop, a Ceramics Workshop and a Digital Fabrication Workshop, where analogue and digital tools were introduced to students before their third year. This previous knowledge of the tools in the laboratory made the process smoother, and should be noted as a pedagogical method. These spaces were intentionally interwoven to form a cohesive learning environment. The selection of materials, digital tools and power machines was deliberately controlled to achieve a harmonious end result, both physically possible to produce by hand and digitally crafted by machines.

The effectiveness of this pedagogy was reinforced by the integration of Maker Labs and workshop facilities, which functioned as a transformative learning environment (Ylioja et al., 2019). As Soomro et al. (2022) note, makerspaces are dynamic, adaptable learning contexts that foster creativity, exploration, and interdisciplinary collaboration. The course therefore utilized a wide range of fabrication facilities: a 3D printing atelier for rapid prototyping and additive experimentation; laser cutting machines for precision processing of geometric forms; a woodworking workshop for traditional joinery and structural assembly; a ceramics atelier with kilns for clay-based exploration; and a model-making studio dedicated to iterative prototyping. These diverse facilities collectively supported a pedagogy of experimentation, enabling students to move fluidly between two modes of making.

Primary materials utilized:

- **Pine wood:** Optimal since it is lightweight, machinable and low in cost. It allows, hand carving/sanding/ joinery experimentation, or can be formed by power tools. Dimensions were standardized (18–20 mm thickness, 20–25 mm circular profiles, and up to 60 mm rectangular sections) to assure correlation across projects, also forcing students to create structural integrity.
- **Ceramic clay:** Selected for its plasticity, versatility, and expressive surface qualities. Students explored glazing, carving, and sanding techniques to discover material behaviour. Dimensions were standardized, but students could produce hollow, solid, or carved forms, could explore slip casting or coiling methods, encouraging direct engagement with clay's behaviour. Clay's shrinkage ratios, drying process and deformations in production or sanding, and surface response during firing were selected as educational tools of craft-based production.
- **PLA filament:** Employed in 3D-printed models for mould production to produce prototypes for the ceramic parts
- **Plexiglass sheets:** Selected for the laser-cut process to bring together 3D printed parts of the top part.

•**Plaster (gypsum):** Utilised in producing gypsum moulds for slip casting and chunking methods.

Three workshops are utilised for the course:

- **Woodworking Lab** – Power and hand tools, with supervisor assistance
- **Ceramics Lab** – Manufacturing, drying and firing equipment and kilns, production surfaces, with supervisor assistance
- **Digital Fabrication Lab** – 3D printers, laser cutters, and modelling computers

The intended dialogue of these spaces and the method of interaction among them brought about a continuous workflow between all mediums, whilst ensuring that students learn from each of them. Students were left to take design decisions based on this experience to translate their ideas into a research question, termed as “problem-based learning” by Frascara (2017) to negotiate between prototype and final result. Imperfections or “happy accidents” led the way to explorations, reinforcing critical thinking around physical constraints and inquiry based on making.

2.5 Integration of crafts and digital pedagogy

This study employed a critical thinking-based reflective iteration model to encourage problem solving and adaptation, which are generative and mind-opening rather than being corrective. This approach started a dialogue between human action and material response, which negates absolute precision, reaffirming the pedagogical importance of manipulating physical matter. Within this framework, the subsections that follow tackle how modelling, ceramic fabrication and woodworking techniques blended in the study.

2.6 3D modelling/printing/molding

Through a structured exercise, 3D modelling (Figure 2) and 3D printing were explained to students, mostly to create basic awareness of limitations of digital fabrication, such as 3D printer dimensions, 3D models’ form and surface quality, and mould compatibility of the design outcome. Through this, they experienced first-hand that complex geometries may require multi-part moulds, which increase fabrication complexity and demand careful alignment. In order to accommodate the constraints of the 3D printer, the models were divided symmetrically into four segments for later assembly, thus transforming the 3D printing phase into a problem-solving exercise, rather than a reproduction exercise.



Figure 2. The visuals of the 3D initial model of a student project

A laser-cut plexiglass base was designed to facilitate mould formation (Fig. 3), while hot silicone proved effective for assembly provided that the final surfaces were thoroughly cleaned. The mould was formed by applying plaster directly over 3D-printed PLA. This method revealed the fragility of the thin shells typical of slip casting, which frequently

fractured during sanding due to the large size of the mould. However, students observed that the same process offered new aesthetic possibilities, particularly when natural print textures and layer patterns were intentionally preserved as design features.

Another important experience similar to 3D printing was the ceramic kiln. The kiln itself introduced physical limits—size constraints, thermal deformation, and material shrinkage. Students were therefore encouraged to design within these conditions, selecting either circular or square ceramic top geometries depending on their design idea. At this stage, the design process was simplified intentionally to enable iterative feedback and a smooth integration with wooden structural components and the ceramic part.

Digitally printed 3D models were coated with a release agent and a mould was fabricated by a quick-setting plaster mixture, which was allowed to dry for at least 72 hours until fully dehydrated. A properly cured mould felt warm and dry to the touch, indicating the expulsion of all residual moisture—a critical step in ensuring the integrity of subsequent slip casts.



Figure 3. The 3D printed model (left), shown both inside and outside the mould, illustrates its role as an intermediary medium in the fabrication process rather than a finished tabletop.

These digital–material preparations set the stage for the ceramic phase, where variability during forming and firing required calibrated tolerances and responsive decision-making.

2.7 Ceramic Production Phase

Students were introduced to one of three ceramic production techniques: slip casting, plate forming, or chunking (press-filling the mould).

Slip casting involves pouring liquid clay (slip) into a mould to produce thin, shell-like, hollow forms, used for achieving a lightweight, uniform body that can be easily reproduced. The thin shell can trace the texture of the mold, making the exercise exciting, since several textures can be tried digitally and transferred to the mold. Large moulds (50 × 50 cm or 50 cm diameter) presented challenges in non-industrial environments, as emptying the mold and drying without deformation is crucial and requires consistent testing to eliminate warping or cracking.

Secondly, another traditional method that is widely utilised is plate forming. This technique enables the creation of large sheets that can be used for trays/tiles. Control of evenness and thickness of the material is crucial (Fig. 4).

Chunking (press-filling) is applied by pressing and filling small chunks of clay, preferably into a mould. This technique is useful for sustainability as leftover material can be revitalised. Aesthetically pleasing surfaces can be reached by manipulating the mould, and chunking

allows organic textures by playing with these small clay pieces. Extensive time and labour are required for this method, and pressing and kneading the clay are crucial for students to exclude any air pockets that can cause cracks in the kiln.



Figure 4. Prof. Çizer explaining chunking method

Chunking (press-filling) is applied by pressing and filling small chunks of clay, preferably into a mould. This technique is useful for sustainability, as leftover material can be revitalised (Hernández García et al., 2024). Aesthetically pleasing surfaces can be reached by manipulating the mould, and chunking allows organic textures by playing with these small clay pieces. Extensive time and labour are required for this method, and pressing and kneading the clay was crucial for students, in order to exclude any air pockets that can cause cracks in the kiln.

In short, there is a growing need to enlarge training in ceramic within design education and hybrid environments can link traditional craft expertise and newly developing digital tools (Pek et al., 2022)

2.8 Woodworking phase

The woodworking phase included designing and building the base structure of the project that will carry the ceramic component, focusing firstly on; structural and load-bearing quality, coherence with the ceramic part and their unity. The material nature of wood was preferred as it is suitable for interactive and experiential learning (Hanták and Konceková, 2023). Students were lectured on proportion, joinery, and balance to grasp the idea of building a structure—how wooden components are joined, to reach a steady load bearing top without compromising aesthetic design considerations (Fig. 6).

Techniques of mortise-and-tenon, cross-lap, and dowel joints were introduced as lectures to fortify the theoretical basis of the students. These techniques are not only for the sake of structural integrity, but can also be starting points of a project that will lead the design idea. Considering the ceramic parts as well, students were encouraged to experiment with the traditional techniques by including ceramic parts. Through this exercise, they grasped how assembly is crucial for structural quality and small deviations lead to unbalanced outcomes, and may risk the ceramic top parts' integration.

After the wooden structures were set, students went back to revising the 3D models, part of the iterative work, to improve joinery methods and details, for more accuracy and strength. This recursive process—digital-craft-revision-adaptation—or “test, simulate, revise/adapt”, made their results based on not form, but material and production based as well. Dialogue

between tangible woodwork and digital modelling underscored a central pedagogical insight: digital tools become most effective when informed by hands-on understanding.

Ultimately, the woodworking phase cultivated spatial reasoning, material empathy, and compositional judgment. Students understood that furniture is a structural system of forces and tolerances, held together by aligning craft sensibility with digital precision (Fig. 5).



Figure 5. Wood workshop production phase for a working prototype

2.9 Production testing phase

The testing stage marked the end of this iterative workflow dialogue, setting the crucial reflective component of the project. Once the ceramic and wooden parts had been formed, physical embodiment required to go back and forth to digital modelling. Through iterative testing and judgement processes, the students progressed to shape components for achieving final structural coherence and aesthetic quality.

One of the most critical parts was the discrepancies between the fired ceramics and the wooden structure, where students used their judgement either to adapt the wooden structure of the ceramic part—or add new details to combine both parts, to achieve the intended compositional value (Fig. 6). This negotiation was one of the crucial learning outcomes, to foster creativity and critical thinking. Wood allowed sanding, carving and adjustments, while ceramics were more fragile when requiring caution after firing. Other iterative solutions could be changing the top part completely, 3D printing a different top part—moulding/producing the top again/firing could be one of the many options to opt for (Fig. 7).

It is possible to state that the product testing stage enhances the capacity to assess joinery, material limitations and evaluation of the process, rather than focusing on the end product. The tactile qualities, refined surfaces and roughness of wood and ceramic are considered by students with utmost care. This analytical approach of misalignments, cracks, mistakes and opportunities bridges control and ambiguity, and overall creativity is achieved with exploration (Fig. 8).

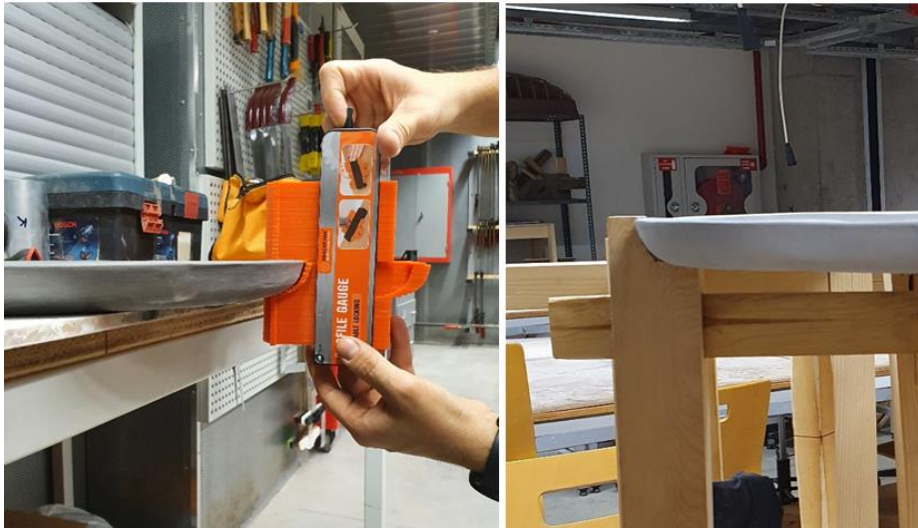


Figure 6. The ceramic top and cross joinery display an intentional degree of imperfection, in contrast to the precision typically achieved through 3D modelling.



Figure 7. A student work before firing (on the left), which joins the top and the structure with a smaller central cross as it could cause breakage otherwise (on the right)



Figure 8. Wood parts should be revised since the top is not perfect anymore

3 Findings and Discussion

The analysis of the qualitative data revealed three interrelated themes that characterise students' learning experiences in the hybrid furniture studio: (1) developing material literacy, (2) cultivating critical and reflective thinking through iterative workflows, and (3) engaging with unexpected outcomes for creative discovery.

The themes can be summarised as follows:

- Material literacy: understanding material behaviour, production methods, and different qualities, from structural integrity to tactile qualities.
- Critical thinking: cultivating experience in an iterative workflow between trial, error, and revision to achieve the desired outcome.
- Creative discovery: negotiating perfection and approaching uncertainty as a tool for creativity, opening new opportunities when precision is needed for structural or aesthetic concerns.

According to the findings of the study, the area in which students provided the most substantial feedback was material engagement. Learning about the material and its associated production methods not only captured their interest but also increased their level of knowledge. For example, students who became familiar with the shrinkage properties of ceramic adapted their wooden structures accordingly, and later approached the revision of broken ceramic pieces with this understanding in mind. As students developed a deeper familiarity with materials, their engagement extended beyond the requirements of the assignment; several students began experimenting with ceramic casting techniques in their free time, suggesting that this knowledge will transfer to other courses and to lifelong learning practices.

A second theme, critical thinking, also developed directly through material literacy. Students learned about material weight, fragility, firing conditions, and structural behaviour, and this expanded their analytical thinking beyond formal concerns. After their initial attempts, many students entered the revision phase with a more holistic mindset, considering not only form but also structure. These reflexive decisions during the second iteration positively influenced the outcome and strengthened their capacity for design judgement.

In addition, the hybrid workflow strengthened students' ability to anticipate material timelines—such as drying, firing, and printing durations—and adjust their design strategies accordingly. Over time, some students began organising informal, time-dependent divisions of labour, coordinating tasks among themselves to manage these material constraints more effectively.

The final theme, creative discovery, appeared in a smaller number of students, yet it was evident that some integrated unexpected results into their design process. One example was a student who designed a table with a cross-joint; upon recognising the risk of breakage, the student revised the joint detail by reducing its size, thereby turning a structural concern into a design opportunity.

Notably, none of the students proceeded to redesign their moulds through 3D printing for a second iteration. This outcome may be attributed to the limited time available in an elective course. Since redesigning the mould and altering the table's structure requires the mould to dry again—a time-consuming step—this finding suggests the need to allocate a longer timeframe for this stage or to incorporate additional course content that encourages deeper engagement with the digital-to-ceramic workflow. Reluctance to explore alternative

geometries also suggests that some students perceived the hybrid process as carrying a higher risk threshold, prompting them to remain within safer procedural boundaries.

The hybrid studio operated as a living laboratory, redefining design and material literacy by expanding beyond technique to encompass environmental, sensory, and contextual knowledge. Students' reflections repeatedly emphasised the interdependence of craft, technology, and creativity. Altogether, the findings affirm that hybrid pedagogy bridges these domains and enables students to internalise methods and skills essential for developing as designers capable of navigating complex problems and practices within the furniture industry. These findings collectively correspond to the three pedagogical pillars outlined earlier, reinforcing the framework presented in Fig. 9.

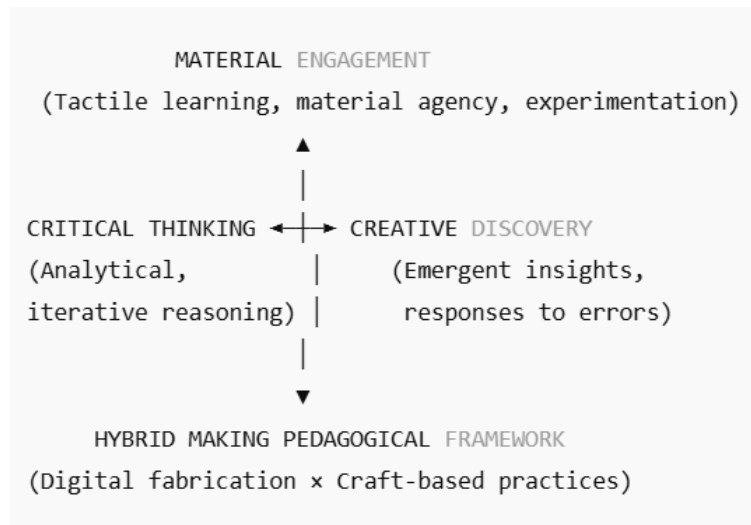


Figure 9. Three Pillars of the Hybrid Furniture Design Pedagogy

4 Conclusion

The conclusions of this work can be summarised as follows:

- Design education that embodies a hybrid workflow unites digital mediums and craft-based practice without denying innovation that is led technologically, with tactile intuition and sensorial feedback.
- Imperfection becomes a learning environment, expanding creative negotiations between trial and error rather than mistakes needing to be corrected and avoided.
- Collaborative, interdisciplinary pedagogical environments—supported by practitioners, artists, and makers—foster expanded forms of knowledge dissemination within the studio.
- Hybrid workflow enhances critical thinking, reflection, and analytical judgement, strengthening students' capacity to revise, adapt, or reconfigure a given brief and to develop personal strategies across diverse modes of production.
- The study additionally shows that students' ability to anticipate material timelines—such as drying, firing, and printing durations—developed as part of the hybrid process, strengthening time-based decision-making and collaborative task coordination.
- A further implication is that risk perception plays a decisive role in students' engagement with digital iteration; reluctance to redesign 3D-printed moulds suggests the need for structural adjustments in curricula to better support experimentation, risk-taking, and extended cycles of digital-material iteration.

- The study also highlights a structural limitation: a significant proportion of students did not pursue secondary iterations of 3D-printed forms. This pattern suggests that time constraints, perceived technical difficulty, or hesitation toward high-risk digital–material transitions may inhibit exploratory behaviour. Addressing this gap in future course structures may strengthen the creative dimension of hybrid making.

Acknowledgement

I would like to express my sincere gratitude to Stefano Pugliese, Argun Tanrıverdi, Prof. Sevim Çizer, and Ayda Eriş for their invaluable expertise and generous support throughout the theoretical, practical, and laboratory phases of this study.

Author Contributions

Hande Atmaca: Conceptualization, Data curation, Methodology, Visualization, Writing – original draft, Writing – review and editing.

Funding statement

No financial support was received for this study.

Conflict of interest statement

The author declares no conflict of interest.

References

- Bernabei, R., and Power, J., (2018). Hybrid design: Combining craft and digital practice. *Craft Research*, 9(1), 119-134, DOI: [10.1386/crre.9.1.119_1](https://doi.org/10.1386/crre.9.1.119_1)
- Boza, L. E., (2006). (Un)intended discoveries: Crafting the design process, *Journal of Architectural Education*, 60(2), 4–7.
- Cheatham, D. M., (2017). A multiple intelligences model for design: Developing the ways designers think as design disciplines expand, *Dialectic*, 1(2), DOI: [10.3998/dialectic.14932326.0001.205](https://doi.org/10.3998/dialectic.14932326.0001.205)
- Frascara, J., (2017). Design and design education: How can they get together? *Art, Design & Communication in Higher Education*, 16(1), 125–131, DOI: [10.1386/adch.16.1.125_1](https://doi.org/10.1386/adch.16.1.125_1)
- Georgiev, G. V., and Nanjappan, V., (2023). Sustainability considerations in digital fabrication design education, *Sustainability*, 15(2), 1519, DOI: [10.3390/su15021519](https://doi.org/10.3390/su15021519)
- Hanták, J., and Končeková, D., (2023). Positive effects of wood in Vorarlberg’s (Austria) timber kindergartens, *Architectural Papers Faculty of Architecture and Design STU*, 28, 36–49, DOI: [10.2478/alfa-2023-0018](https://doi.org/10.2478/alfa-2023-0018)
- Hernández García, L. C., Monteiro, S. N., and Lopera, H. A. C., (2024). Recycling clay waste from excavation, demolition, and construction: trends and challenges, *Sustainability*, 16(14), 6265. DOI: [10.3390/su16146265](https://doi.org/10.3390/su16146265)
- Ingold, T., (2012). Toward an ecology of materials, *Annual Review of Anthropology*, 41, 427–442, DOI: [10.1146/annurev-anthro-081309-145920](https://doi.org/10.1146/annurev-anthro-081309-145920)
- Ingold, T. (2013). *Making: Anthropology, archaeology, art and architecture*. Routledge, DOI: [10.4324/9780203559055](https://doi.org/10.4324/9780203559055)
- Kahraman, M. U., Şekerci, Y., Bal, H., and Bakır, K. E., (2024). Human-centered approach for furniture design studio course in interior design education: A case study, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 7(1), 121–135, DOI: [10.33725/mamad.1485323](https://doi.org/10.33725/mamad.1485323)

- Kılıç, O., (2016). Role of digital production techniques in furniture manufacturing, *Muğla Journal of Science and Technology*, 2(2), 72–76, DOI: [10.22531/muglajsci.283622](https://doi.org/10.22531/muglajsci.283622)
- Leatherbarrow, D., (2009). *Architecture oriented otherwise*, University of Pennsylvania Press.
- Malafouris, L., (2023). Enactyichism: Enacting chance in creative material engagement, *Possibility Studies & Society*, 1(3), 300-310, DOI: [10.1177/2753869923117817](https://doi.org/10.1177/2753869923117817)
- McCullough, M., (1996). *Abstracting craft: The practiced digital hand*, MIT Press, ISBN 0-262-13326-1
- McCullough, M., (2005). *The hand across twenty years of digital craft*, Ann Arbor, MI:: University of Michigan Press.
- Mujir, M. S., Anwar, R., and Hassan, O. H., (2018). Advanced digital design prototyping for manufacturing of exclusive wood carving furniture products, *Proceedings of the Art and Design International Conference (AnDIC 2016)*, 291–297, Springer, DOI: [10.1007/978-981-13-0487-3_32](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0487-3_32)
- Nasir, O., Iqbal, M. F., and Kamal, M. A., (2022). An appraisal of 3D printing technology in interior architecture and product design, *Architecture Engineering and Science*, 3(3), 188–197, DOI: [10.32629/aes.v3i3.1009](https://doi.org/10.32629/aes.v3i3.1009)
- Pek, E., Cihaner Keser, S., and Güler, Ç., (2022). Deficiencies and potential corrections in ceramic art education according to the ceramic industry employees, *Cypriot Journal of Educational Sciences*, 17(9), 10.18844/cjes.v17i9.7739, DOI: [10.18844/cjes.v17i9.7739](https://doi.org/10.18844/cjes.v17i9.7739)
- Rowe, A., (2024). A necessary shift in design education: From outputs to outcomes, *International Journal of Art & Design Education*, 44(1), 4–17, DOI: [10.1111/jade.12521](https://doi.org/10.1111/jade.12521)
- Soomro, S. A., Casakin, H., and Georgiev, G. V., (2021). Sustainable design and prototyping using digital fabrication tools for education, *Sustainability*, 13(3), 1196, DOI: [10.3390/su13031196](https://doi.org/10.3390/su13031196)
- Soomro, S. A., Casakin, H., and Georgiev, G. V., (2022). A systematic review on FabLab environments and creativity: Implications for design, *Buildings*, 12(6), DOI: [10.3390/buildings12060804](https://doi.org/10.3390/buildings12060804)
- Yan, W., Zhao, D., and Mehta, A., (2023). Fabrication-aware design for furniture with planar pieces, *Robotica*, 41(1), 48–73, DOI: [10.1017/S0263574722000443](https://doi.org/10.1017/S0263574722000443)
- Ylioja, J., Georgiev, G. V., Sánchez, I., and Riekk, J., (2019). Academic recognition of Fab Academy, *Proceedings of the FabLearn Europe 2019 Conference*, 1–7, DOI: [10.1145/3335055.3335056](https://doi.org/10.1145/3335055.3335056)
- Zhang, Z., and Wei, P., (2024). The beauty of clay: Exploring contemporary ceramic art as an aesthetic medium in education, *Comunicar: Revista Científica de Comunicación y Educación*, 78, 67-81, DOI: [10.58262/V32I78.6](https://doi.org/10.58262/V32I78.6)
- Zoran, A., (2013). Hybrid craft: Showcase of physical and digital integration in design and craft skills, *Leonardo*, 48(4), 384-398, DOI: [10.1162/LEON_a_01093](https://doi.org/10.1162/LEON_a_01093)
- Zoran, A., and Buechley, L., (2013). Hybrid reassemblage: An exploration of craft, digital fabrication, and artifact uniqueness, *Leonardo*, 46(1), 4–10, DOI: [10.2307/23468110](https://doi.org/10.2307/23468110)



Influence of resin content on the properties of particleboard made from different parts of oil palm biomass

Nurrohana Ahmad¹ , Siti Noorbaini Sarmin¹ , Lee Seng Hua¹ , Yusri Helmi Muhammad¹ , Wan Mohd Nazri Wan Abdul Rahman¹ , Nur Sakinah Mohamed Tamat² 

ABSTRACT: The increasing availability of oil palm biomass offers significant potential as a sustainable raw material for particleboard, particularly for non-structural furniture and interior applications traditionally dominated by wood-based panels. This study investigated the physical and mechanical properties of particleboards manufactured from three oil palm residues; trunks (OPT), fronds (OPF), and empty fruit bunches (EFB) using urea-formaldehyde resin at contents of 8%, 10%, and 12%. All boards were produced at a target density of 700 kg/m³ and hot-pressed at 165°C for 360 seconds. Particleboards fabricated from OPT satisfied the minimum mechanical requirements of the standard at all resin contents, indicating their suitability for furniture components such as panels, shelving, and carcass materials. OPF-based boards achieved acceptable strength only at the highest resin level (12%), while EFB-based boards failed to meet the required mechanical criteria regardless of resin content. None of the particleboards met the dimensional stability standard, with 24h thickness swelling values exceeding the permissible <12% limit under water immersion. Overall, the results demonstrate that oil palm trunk residues show the greatest potential for value-added particleboard production in furniture and interior applications, supporting the broader objective of reducing reliance on solid wood resources in the wood-based panel industry.

Keywords: Oil palm biomass, Oil Palm Trunk, Particleboard, Resin content

Yağ palmyesi biyokütlesinin farklı kısımlarından yapılan yonga levhanın özellikleri üzerindeki reçine içeriğinin etkisi

ÖZ: Yağ palmyesi biyokütlesinin artan mevcudiyeti, özellikle geleneksel olarak ahşap bazlı panellerin hakim olduğu yapısal olmayan mobilya ve iç mekan uygulamaları için, yonga levha üretimi için sürdürülebilir bir hammadde olarak önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu çalışmada, üç yağ palmyesi kalıntısından (gövde (OPT), yapraklar (OPF) ve boş meyve salkımları (EFB)) üretilen yonga levhaların fiziksel ve mekanik özellikleri, %8, %10 ve %12 oranlarında üre-formaldehit reçinesi kullanılarak incelenmiştir. Tüm levhalar 700 kg/m³ hedef yoğunluğunda üretildi ve 165°C'de 360 saniye süreyle sıcak preslenmiştir. OPT'den üretilen yonga levhalar, tüm reçine içeriklerinde standardın minimum mekanik gereksinimlerini karşılamış, bu da paneller, raflar ve karkas malzemeleri gibi mobilya bileşenleri için uygun olduklarını göstermektedir. OPF bazlı levhalar kabul edilebilir mukavemete ancak en yüksek reçine seviyesinde (12%) ulaşırken, EFB bazlı levhalar reçine içeriğinden bağımsız olarak gerekli mekanik kriterleri karşılayamadı. Parçacık levhaların hiçbirisi boyut kararlılığı standardını karşılamadı; 24 saatlik kalınlık şişme değerleri su altında batırıldığında izin verilen <%12 sınırını aştı. Genel olarak, sonuçlar, yağ palmyesi gövdesi kalıntılarının mobilya ve iç mekan uygulamalarında katma değerli yonga levha üretimi için en büyük potansiyeli gösterdiğini ve bu durumun, ahşap bazlı panel endüstrisinde katı ahşap kaynaklarına bağımlılığı azaltma yönündeki daha geniş hedefi desteklediğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Yağ palmyesi biyokütlesi, Yağ palmyesi gövdesi, Yonga levha, Reçine içeriği

Article history, Received: 14.11.2025, Revised: 17.12.2025, Accepted: 17.12.2025, Published: 23.12.2025, *nurrohana@uitm.edu.my

¹Universiti Teknologi MARA Cawangan Pahang, Faculty of Applied Sciences, Department of Wood Industries, Pahang, Malaysia

²Universiti Malaysia Kelantan, Faculty of Bioengineering and Technology, Jeli, Kelantan, Malaysia

To cite: Nurrohana, A., Siti Noorbaini, S., Lee, S. H., Yusri Helmi, M., Wan Mohd Nazri, W. A. R., Nur Sakinah, M. T., (2018). Influence of resin content on the properties of particleboard made from different parts of oil palm biomass, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 8 (2), 420-429, DOI: [10.33725/mamad.1803174](https://doi.org/10.33725/mamad.1803174)

1 Introduction

The wood-based panel industry has experienced a decline in wood supply attributed to new legislative regulations on wood utilisation in specific countries, heightened environmental concerns, and the global demand for wood raw materials. To address the challenges associated with wood use in particleboard manufacturing, it is imperative to explore abundant feedstocks derived from renewable agricultural residues and wood byproducts as a substitute, thereby reducing negative environmental impacts. Agricultural wastes, considered biomass resources, have been extensively utilised and converted into various beneficial products. These applications address environmental issues and enhance pollution management.

Among agricultural commodities, oil palm generates a large and regionally concentrated biomass stream; production has expanded significantly in recent decades and is dominated by Indonesia and Malaysia (Zaimi et al., 2025; Zakaria et al., 2024). More important than absolute production figures, however, are the waste-management challenges associated with oil palm cultivation and processing. A high proportion of oil palm biomass; empty fruit bunches (EFB), mesocarp fibre (MF), palm kernel shells (PKS), oil palm trunks (OPT), fronds (OPF), and palm oil mill effluent (POME) is currently under-utilised (Rajakal et al., 2024; Manimaran et al., 2025). Studies report that only a small fraction of available biomass is repurposed, leaving substantial quantities classified as waste and creating environmental and logistical burdens for plantations and mills.

Efficient utilisation of oil palm residues can deliver multiple benefits, reducing disposal problems, generating new revenue streams, and supplying low-cost feedstock for industrial applications. Converting oil palm biomass into particleboard addresses both resource scarcity in the wood-panel sector and the need for cost-effective, sustainable building materials. Prior work has demonstrated potential performance trade-offs when substituting agricultural residues for wood particles; therefore, material selection, particle preparation, and binder formulation are critical to achieving boards that meet technical standards (Ajayi et al., 2025; Zaimi et al., 2025).

The present study aims to evaluate the physical and mechanical properties of particleboards manufactured from three oil palm residues, namely oil palm trunk (OPT), oil palm frond (OPF), and empty fruit bunch (EFB). Unlike previous studies that focused on single biomass sources or alternative adhesives, this work systematically compares OPT, OPF, and EFB under identical processing conditions to identify their suitability for particleboard applications. This particleboard produced from urea-formaldehyde (UF) with three resin loadings (8%, 10%, 12%). Physical properties (thickness swelling, water absorption) and mechanical properties (modulus of rupture, modulus of elasticity, internal bond) were measured to assess the technical viability of these biomass residues as partial or full substitutes for conventional wood particles. The results are discussed with respect to process optimization and the potential role of oil palm-derived particleboards in sustainable materials strategies and circular-economy applications.

2 Material and Method

2.1 Material

The materials utilized in the production of particleboard (PB) included 25 years of oil palm trunk (OPT), oil palm frond (OPF), and oil palm empty fruit bunch (EFB). These biomass resources were possessed from an oil palm plantation in Ulu Jempul, and the Jengka Advance Renewable Energy Plant (JAREP) in Jengka 9. The resin used was urea formaldehyde (UF), bought from Aica Malaysia Sdn. Bhd., Senawang.

OPT were debarked, cut into blocks, and processed with a disc flaker to produce uniform strands. The petiole and leaflets of OPF were removed from the fronds. The fronds were initially chipped with a chipper to reduce their size before particle preparation. Both OPF and EFB were processed into particles using a knife ring flaker separately, which ensured consistent particle geometry suitable for panel manufacturing. The resulting particles were screened with a vibrating screener to separate and remove fine fractions, as excessive fines could negatively influence resin distribution and impair the mechanical properties of the particleboard. The screened particles within the size range of <2.0 mm to 0.5 mm were then oven-dried at 60°C for 24 hours to reduce their moisture content (MC) to below 5%.

2.2 Method

Dried particles were used from OPT, OPF and EFB as the primary raw material for board fabrication. The biomass was blended with urea-formaldehyde (UF) resin using a particleboard mixer, with solid content 64.5% and resin contents adjusted to 8%, 10%, and 12% based on dry particle weight. To avoid adhesion during mat formation and pressing, a silicone release agent was applied to the surfaces of the metal plates. The resin-coated particles with 12% MC then manually distributed into wooden moulds measuring 340 mm × 340 mm. A preliminary cold pressing was carried out for 60 seconds to consolidate the mat and minimize particle displacement. This was followed by hot pressing at 165 °C for 6 minutes to achieve a target thickness of 12 mm. The hot-pressing process was conducted using three sequential pressure stages: the particleboard mat was initially pressed at 1800 psi for 180 seconds, followed by 1200 psi for 120 seconds, and finally 800 psi for 60 seconds. The pressed boards were subsequently conditioned for seven days at 20 ± 2 °C and 65 ± 5% relative humidity prior to physical and mechanical evaluation.

The evaluation of properties including thickness swelling (TS), water absorption (WA), modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and internal bond strength (IB) was conducted in accordance with the JIS A 5908:2003 standard (JIS, 2003).

Regardless of the particleboard variant, two replicate boards were produced for each experimental condition. Internal bond strength, thickness swelling, and water absorption were evaluated using 50 mm × 50 mm specimens, with ten repetitions conducted for each test. The modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) were assessed using 230 mm × 50 mm specimens, with six repetitions performed for each mechanical properties.

The data were subjected to analysis of variance (ANOVA) using the Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) software (version 28, IBM, Armonk, NY, USA). Descriptive statistical analysis was conducted to obtain mean values and corresponding standard deviations, and the standard deviations were used to construct the error bars presented in the graphical results. Post hoc comparisons among group means were carried out using Duncan's Multiple Range Test (DMRT) to identify statistically significant differences at a confidence level of $p \leq 0.05$. In addition, the measured physical and mechanical properties were evaluated against the minimum requirements specified in the JIS A 5908 standard (JIS, 2003).

3 Results and Discussion

Table 1 presents the ANOVA results for the effects of material type and resin content on the physical and mechanical properties of particleboards produced from different oil palm biomass sources. Both factors significantly influenced WA, TS, MOR, MOE, and IB ($p < 0.01$), indicating that particleboard performance is strongly governed by the intrinsic characteristics of the raw material and the degree of resin bonding. The significant interaction observed between material type and resin content for most properties further suggests that the

response of particleboard performance to resin addition is material-specific, a trend commonly reported in biomass-based particleboards derived from heterogeneous lignocellulosic resources.

Table 1 Summary of ANOVA findings at $P < 0.05$ concerning the interaction effects of material and resin content on particleboard qualities

SOV	WA	TS	MOR	MOE	IB
Material (M)	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
Resin Content (RC)	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
M*RC	0.013*	0.000**	0.002*	0.003*	0.168ns

SOV source of variance, ** highly significant $p < 0.01$, * significant $p < 0.05$, ns not significant $p > 0.05$

3.1 Analysis on TS and WA of PB

Table 2 presents a summary of the TS and WA values of particleboard composed of EFB, OPF, and OPT, bonded with varying resin contents. At identical resin content, particleboard composed of OPT exhibits superior TS values compared to that made from EFB and OPF. The TS values of the EFB particleboard bonded at varying resin contents range from 15.27% to 35.85%, whereas those of OPF and OPT range from 20.52% to 22.06% and 32.20% to 39.10%, respectively. In contrast to EFB, both OPF and OPT possess a significant proportion of parenchymatous tissues (thin-walled cells with large lumens) that are inclined to absorb and retain greater amounts of water (Abdul Khalil et al. 2008). Consequently, OPF and OPT particleboard exhibited greater water absorption than EFB particleboard. The TS values diminished as the resin content increased (Figure 1). A comparable observation was noted for WA values, which diminished with increasing content (Figure 2). Nonetheless, none of the particleboard manufactured in this study conformed to the maximum permissible TS value of $< 12\%$ as specified in JIS A 5908 standard (JIS, 2003). (Figure 1). The resin content is the primary determinant influencing the thickness swelling of particleboard (Boruszewski et al. 2022). Hong et al. (2017) stated that post-curing, the UF resin developed a rigid crosslinked structure that is impermeable to water. A greater resin content results in an increased proportion of hardened structures, leading to a more dimensionally stable particleboard.

Table 2. TS and WA of various oil palm biomass types in particleboard

Type	Material	Resin Content (%)	Water Absorption (%)	Thickness Swelling (%)
1	EFB	8	98.93±7.89 ^b	35.85±2.97 ^e
2		10	86.48±4.10 ^a	26.69±2.14 ^c
3		12	81.06±5.77 ^a	15.27±0.91 ^a
4	OPF	8	123.70±9.60 ^d	22.06±2.54 ^b
5		10	104.48±12.73 ^{bc}	21.56±4.84 ^b
6		12	80.98±8.24 ^a	20.52±5.47 ^b
7	OPT	8	108.41±12.03 ^c	39.10±2.09 ^f
8		10	105.10±10.17 ^{bc}	35.61±2.92 ^e
9		12	105.10±7.58 ^{bc}	32.20±4.23 ^d

Means followed by the different superscript letters in the same column are significantly different at $p \leq 0.05$; EFB = empty fruit bunches, OPF = oil palm front; OPT = oil palm trunk

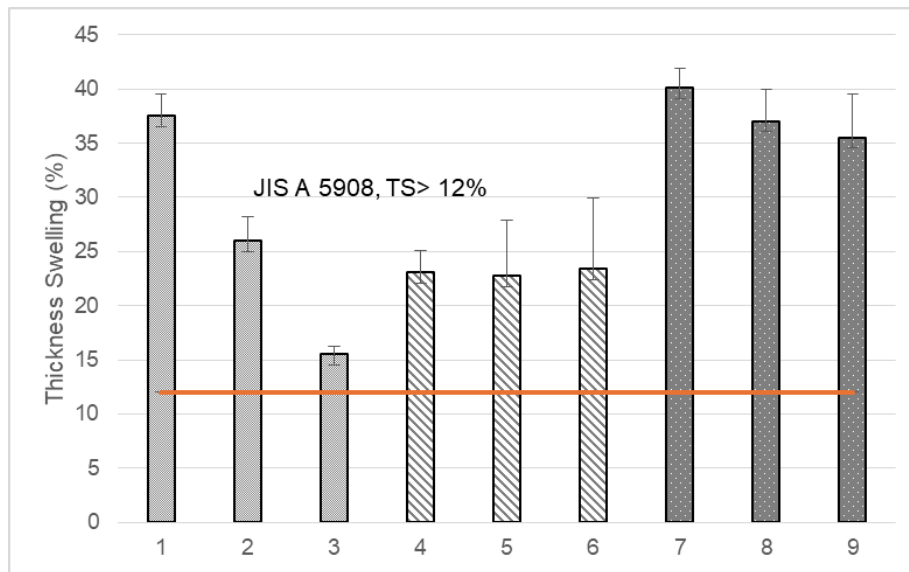


Figure 1. TS of various oil palm biomass types in particleboard compared to JIS A 5908 (2003)

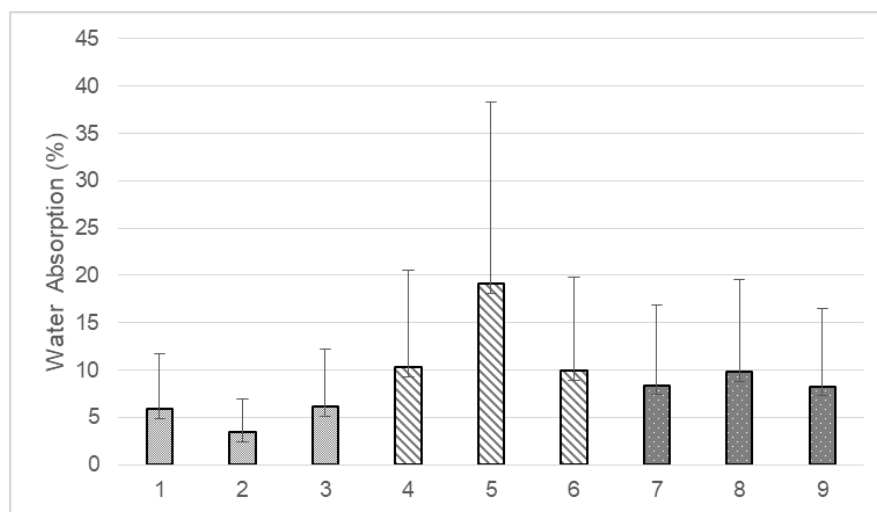


Figure 2. WA of various oil palm biomass types in particleboard

3.2 Mechanical properties of PB

The mechanical properties, including MOR, MOE, and IB of the particleboard, are presented in Table 3. OPT particleboard exhibited markedly superior MOR and MOE relative to its OPF and EFB counterparts. Concurrently, EFB particleboard demonstrated the least bending strength among the three particleboard varieties. A comparable trend was also noted for IB. The observation may be ascribed to the bulk density of the materials utilized in particleboard production. According to a study by Zakaria et al. (2021), the bulk densities of EFB, OPF, and OPT particles were 670 kg/m³, 560 kg/m³, and 460 kg/m³, respectively. Materials with lower bulk density can attain a more compact structure when subjected to hot pressing (Boruszewski et al. 2016). A more compact structure will diminish the voids present in the particleboard, thereby enhancing its mechanical properties. Lee et al. (2015) reported that particleboard with lower bulk density can achieve a higher compaction ratio and, consequently, superior strength properties. The subpar mechanical properties of the EFB particleboard may be attributed to residual oil on the EFB fibers (Norul Izani et al. 2012). The oil obstructs the uniform distribution of resin on the EFB fibers, resulting in inferior

mechanical properties. Nonetheless, augmenting resin content markedly enhanced the mechanical properties of the particleboard. For example, when the resin content was elevated from 8% to 12%, the modulus of rupture (MOR) of the oriented strand board (OSB) rose from 22.15 MPa to 24.37 MPa, while the internal bonding (IB) increased from 1.66 MPa to 2.43 MPa. The resin content significantly affects the mechanical properties of the resulting particleboards (Barrag  n-Lucas et al. 2019). With an increase in resin content, the particles achieved comprehensive resin coverage, resulting in enhanced bonding sites between particles and ultimately improving MOR, MOE, and IB (Ghalehno et al. 2013).

Table 3. Strength properties (MOR, MOE, IB) of various oil palm biomass types in particleboard

Type	Material	Resin Content (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	IB (MPa)
1	EFB	8	5.00±0.30 ^a	701±45.46 ^a	0.07±0.01 ^a
2		10	6.85±0.70 ^a	888±59.57 ^{ab}	0.09±0.03 ^a
3		12	9.19±0.03 ^b	1050±56.62 ^b	0.16±0.03 ^{ab}
4	OPF	8	13.52±2.22 ^c	2212±481 ^c	0.17±0.06 ^{ab}
5		10	14.95±0.87 ^c	2263±170 ^c	0.33±0.13 ^b
6		12	21.28±3.15 ^d	3211±387 ^d	0.70±0.25 ^c
7	OPT	8	22.15±1.76 ^d	2972±132 ^d	1.66±0.27 ^d
8		10	23.20±1.01 ^{de}	3135±138 ^d	1.76±0.31 ^d
9		12	24.37±1.31 ^e	3243±274 ^d	2.43±0.41 ^e

Means followed by the different superscript letters in the same column are significantly different at $p \leq 0.05$; EFB = empty fruit bunches, OPF = oil palm front; OPT = oil palm trunk

Figure 3 - 5 illustrates the MOR, MOE, and IB strength of panels produced with varying resin percentage. The JIS A 5908:2003 requires minimum MOR, MOE and IB values of 18 MPa, 3000 MPa and 0.3 MPa, respectively. All panels manufactured with OPT met the JIS standard criteria for MOR, MOE, and IB strength at all three levels of resin content. The panels manufactured from EFB and OPF failed to meet the criteria for MOR, MOE, and IB, except for the OPF variant with a resin content of 12%. The properties of particleboards manufactured with OPT exhibited a distinctly different pattern when compared to those produced with EFB and OPF. The particleboard containing 12% resin demonstrated the highest MOR and MOE when manufactured with OPT particles, reaching values of 24.37 MPa and 3243 MPa, respectively. At a consistent resin content, the values for MOR and MOE showed an initial increase during the production of particleboard using EFB and OPF. The same phenomenon was also observed with IB strength properties. The data suggests that an optimal resin content of 12% is necessary for the effective production of oil palm biomass particleboard. This finding aligns with Ayrilmis, Kwon, & Han (2012), who discovered that the mechanical properties of single-layer composite particleboards composed of 70 wt% wood particles and 30 wt% rice husk particles did not significantly improve in bending strength and modulus of elasticity with increased UF and PF resin contents, except at the 12 wt% resin content.

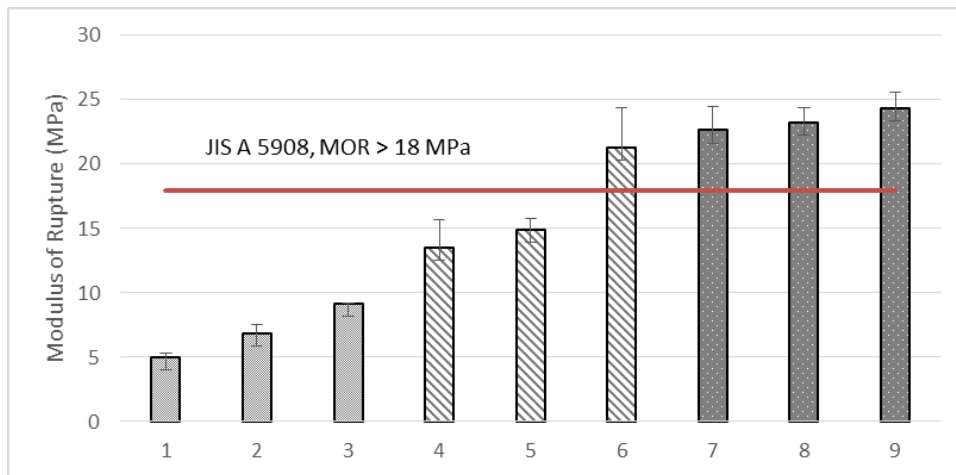


Figure 3. MOR of various oil palm biomass types in particleboard Compared to JIS A 5908 (2003)

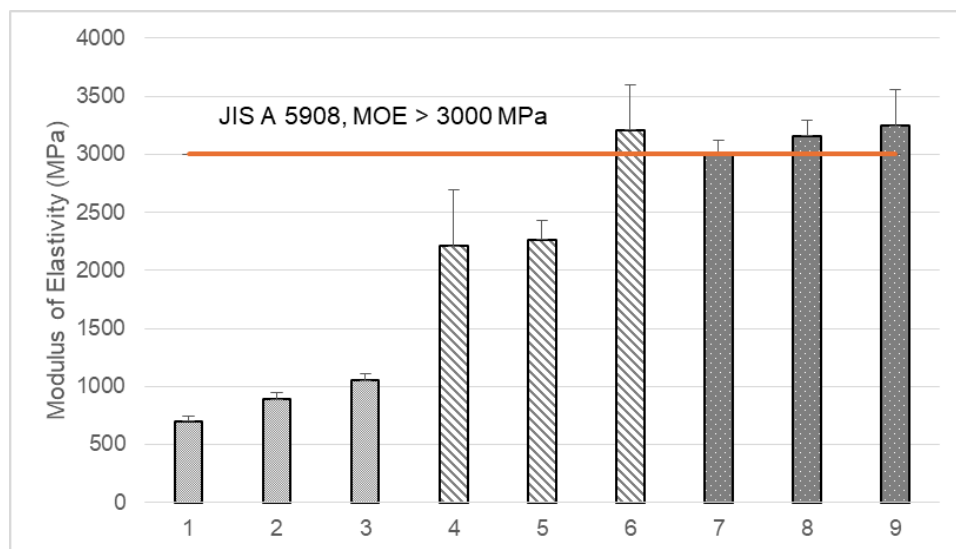


Figure 4. MOE of various oil palm biomass types in particleboard compared to JIS A 5908 (2003)

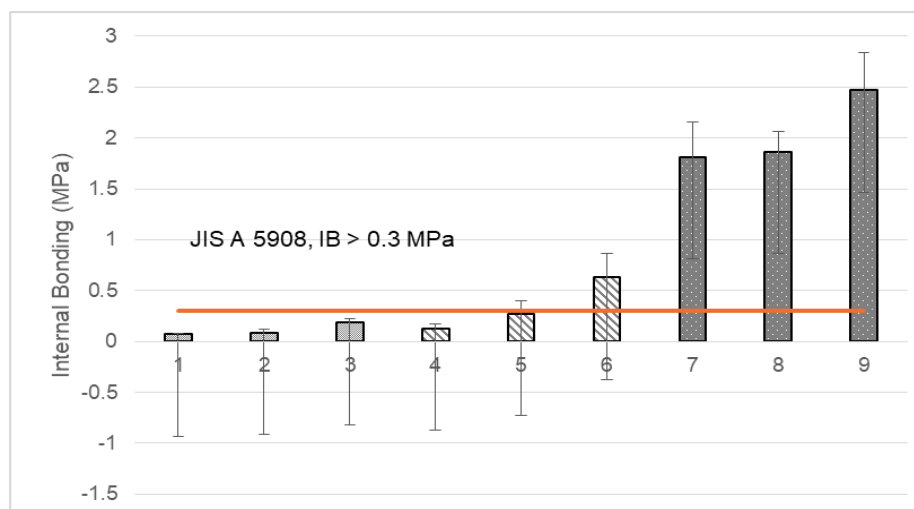


Figure 5. Internal bond strength of various oil palm biomass types in particleboard compared to JIS A 5908 (2003)

4. Conclusion

In this study, the physical and mechanical properties of particleboards manufactured from three oil palm residues, OPT, OPF, and EFB, were investigated. Based on the data obtained, the following conclusions can be drawn.

- This study confirms that resin content and biomass type significantly influence the physical and mechanical performance of particleboards produced from oil palm residues.
- Among the materials evaluated, oil palm trunk (OPT) demonstrated the greatest suitability as a raw material, consistently meeting the mechanical requirements of JIS A 5908 across all resin contents.
- In contrast, oil palm frond (OPF) particleboards achieved acceptable strength only at the highest resin level, while empty fruit bunch (EFB) boards failed to satisfy the standard requirements regardless of resin content, likely due to residual oil and poor interfacial bonding.
- Although increased resin content generally improved strength and dimensional stability, none of the panels complied with the standard limits for thickness swelling, indicating that moisture resistance remains the primary limitation.
- Overall, OPT shows strong potential for particleboard manufacturing, whereas OPF and EFB require additional treatments or material modification to enhance their performance.
- The effective utilization of oil palm biomass in panel products offers a sustainable pathway for improving resource efficiency and reducing agricultural waste in the wood-based panel industry.

Acknowledgement

This study presented at “The International Environment, Social and Governance Conference (i-ESG) 2025”. The abstract section of the study published in i-ESG2025: Programme Book (Page; 23).

Author Contributions

Nurrohana Ahmad: Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Supervision, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing, **Siti Noorbaini Sarmin:** Conceptualization, Formal Analysis, Investigation, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing, **Lee Seng Hua:** Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Validation, Visualization, Writing – original draft, **Yusri Helmi Muhammad:** Conceptualization, Methodology, Project administration, Resources, Validation, Visualization, **Wan Mohd Nazri Wan Abdul Rahman:** Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Visualization, Writing – original draft, **Nur Sakinah Mohamed Tamat:** Conceptualization, Investigation, Project administration, Resources, Visualization, Writing – original draft.

Funding statement

This project was not supported.

Conflict of interest statement

The authors declare no conflict of interest.

References

- Abdul Khalil, H. P. S., Siti Alwani, M., Ridzuan, R., Kamarudin, H., and Khairul, A., (2008). Chemical composition, morphological characteristics, and cell wall structure of Malaysian oil palm fibres, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 47(3), 273-280, DOI: [10.1080/03602550701866840](https://doi.org/10.1080/03602550701866840)
- Ajayi, S. M., Olusanya, S. O., Didunyemi, A. E., Abimbade, S. F., Olumayede, E. G., and Akintayo, C. O., (2025). Physicochemical properties of oil palm biomass waste fibres and its cellulose for engineering applications: A review, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(5), 6545-6555, DOI: [10.1007/s13399-024-05486-5](https://doi.org/10.1007/s13399-024-05486-5)
- Ayrilmis, N., Kwon, J. H., and Han, T. H., (2012). Effect of resin type and content on properties of composite particleboard made of a mixture of wood and rice husk, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 38, 79-83, DOI: [10.1016/j.ijadha.2012.04.008](https://doi.org/10.1016/j.ijadha.2012.04.008)
- Barragàn-Lucas, A. D., Llerena-Miranda, C., Quijano-Aviles, M. F., Chóez-Guaranda, I. A., Maldonado-Guerrero, L.C., and Manzano-Santana, P. I., (2019). Effect of resin content and pressing temperature on banana pseudo-stem particleboards properties using full factorial design, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91, e20180302, DOI: [10.1590/0001-3765201920180302](https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180302)
- Boruszewski, P., Borysiuk, P., Jankowska, A., and Pazik, J., (2022). Low-density particleboards modified with blowing agents-characteristic and properties, *Materials*, 15(13), 4528, DOI: [10.3390/ma15134528](https://doi.org/10.3390/ma15134528)
- Boruszewski, P., Borysiuk, P., Maminski, M., and Czechowska, J., (2016). Mat compression measurements during low-density particleboard manufacturing, *BioResources*, 2016, 11, 6909–6919, DOI: [10.15376/biores.11.3.6909-6919](https://doi.org/10.15376/biores.11.3.6909-6919)
- Ghalehno, M. D., Nazerian, M., and Bayatkashkoli, A. (2013). Experimental particleboard from bagasse and industrial wood particles, *International Journal of Agriculture and Crop Sciences (IJACS)*, 5(15), 1626-1631
- Hong, M. K., Lubis, M. A. R., and Park, B. D. (2017). Effect of panel density and resin content on properties of medium density fiberboard, *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 45(4), 444-455, DOI: [10.5658/WOOD.2017.45.4.444](https://doi.org/10.5658/WOOD.2017.45.4.444)
- JIS A 5908 (2003). Japanese Industrial Standard for Particleboard. Japanese Standards Association Tokyo, Japan.
- Lee, S.H., Ashaari, Z., Chen, L.W., San, H.P., Peng, T.L., Chow, M.J., Chai, E.W., and Chin, K.L., (2015). Properties of particleboard with oil palm trunk as core layer in comparison to three-layer rubberwood particleboard, *Journal of Oil Palm Research*, 2015, 27, 67–74.
- Manimaran, M., Norizan, M. N., Kassim, M. H. M., Adam, M. R., Abdullah, N., and Norrahim, M. N. F. (2025). Functionalization and stability of palm oil biomass nanocellulose—an overview, *Polimery*, 70(2), 73-92, DOI: [10.14314/polimery.2025.2.1](https://doi.org/10.14314/polimery.2025.2.1)
- Norul Izani, M.A., Paridah, M.T., Astimar, A.A., Mohd, N., and Anwar, U.M.K., (2012). Mechanical and dimensional stability properties of medium-density fibreboard produced from treated oil palm empty fruit bunch, *Journal of Applied Sciences*, 2012, 12, 561–567.
- Rajakal, J. P., Ng, F. Y., Zulkifli, A., How, B. S., Sunarso, J., Ng, D. K., and Andiappan, V., (2024). Analysis of current state, gaps, and opportunities for technologies in the Malaysian

oil palm estates and palm oil mills towards net-zero emissions, *Heliyon*, 10(10), [10.1016/j.heliyon.2024.e30768](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30768)

Zaimi, H. S., Amin, M. A., Shukor, H., Faizal, S., Muduli, K., Ales, S. K., and Syed, S. A., (2025). Advancing biomass utilization in Malaysia: challenges, opportunities, and policy implications, *Biomass Processing for Sustainable Circular Economy*, 9-36, DOI: [10.1007/978-981-96-6279-1_2](https://doi.org/10.1007/978-981-96-6279-1_2)

Zakaria, M. R., Farid, M. A. A., Hafid, H. S., Andou, Y., and Hassan, M. A., (2024). Practical role of oil palm fronds in Malaysia's sustainable palm oil industry, *Industrial Crops and Products*, 222, 119753, DOI: [10.1016/j.indcrop.2024.119753](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119753)

Zakaria, R., Bawon, P., Lee, S. H., Salim, S., Lum, W. C., Al-Edrus, S. S. O., and Ibrahim, Z., (2021). Properties of particleboard from oil palm biomasses bonded with citric acid and tapioca starch, *Polymers*, 13(20), 3494, DOI: [10.3390/polym13203494](https://doi.org/10.3390/polym13203494)



Non-destructive assessment of dynamic properties of acetylated beech wood (*Fagus orientalis* L.) under varying impregnation and reaction times

Seyyed Khalil HosseiniHashemi^{1*} , Mojtaba Esfandiyar¹ 

ABSTRACT: The aim of this study was to investigate the effect of impregnation and reaction times during acetylation on the dynamic mechanical and acoustic properties of beech wood using non-destructive vibration testing. Acetylated solid wood from beech (*Fagus orientalis* L.) was prepared with acetic anhydride, without catalyst, by soaking impregnation. Oven-dried, defect-free specimens ($20 \times 20 \times 360 \text{ mm}^3$; $R \times T \times L$) were treated at $120 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ under oven-dry conditions with impregnation times of 60 or 180 min and reaction times of 60 or 120 min. Dynamic properties of modified and unmodified samples were measured by free flexural and longitudinal vibration tests in radial and tangential directions. Impregnation and reaction durations significantly affected physical and dynamic properties. Longer impregnation (Im180) increased density and weight percent gain ($\text{WPG} \approx 4\%$), indicating greater chemical uptake and reduced porosity. In contrast, extended reaction time (Re120) reduced the dynamic modulus of elasticity and acoustic coefficient by about 6-8%, suggesting partial stiffness loss at higher acetylation intensity. The best balance between mass gain, stiffness retention, and acoustic performance occurred at moderate conditions (Im60-Re60).

Keywords: Beech, Acetylation, WPG, MOE, Density, Shear, Acoustic

Değişen emprenye ve reaksiyon süreleri altında asetillenmiş kayın odununun (*Fagus orientalis* L.) dinamik özelliklerinin tahribatsız değerlendirilmesi

ÖZ: Bu çalışmanın amacı, tahribatsız titreşim testleri kullanarak, asetilasyon sırasında emprenye ve reaksiyon sürelerinin kayın ağacının dinamik mekanik ve akustik özellikleri üzerindeki etkisini incelemektir. Katkısız olarak asetik anhidrit ile emprenye yöntemiyle asetillenmiş katı kayın (*Fagus orientalis* L.) örnekleri hazırlanmıştır. Fırın kurusu, kusursuz örnekler ($20 \times 20 \times 360 \text{ mm}^3$; $R \times T \times L$) $120 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de fırın kurusu koşullarında 60 veya 180 dakikalık emprenye süreleri ve 60 veya 120 dakikalık reaksiyon süreleri ile muamele edilmiştir. Modifiye ve modifiye edilmemiş örneklerin dinamik özellikleri, radyal ve teğet yönlerde serbest eğilme ve boyuna titreşim testleri ile ölçülmüştür. Emprenye ve reaksiyon süreleri, fiziksel ve dinamik özellikleri önemli ölçüde etkilemiştir. Uzun emprenye süresi (Im180) yoğunluk ve ağırlık kazanımını ($\text{WPG} \approx \%4$) artırmış, daha fazla kimyasal alımı ve azalmış gözenekliliği göstermiştir. Buna karşılık, uzun reaksiyon süresi (Re120) dinamik elastik modülü ve akustik katsayıyı yaklaşık %6-8 azaltmış, yüksek asetilasyon yoğunluğunda kısmi sertlik kaybını işaret etmiştir. Kütle kazanımı, sertlik korunumu ve akustik performans arasındaki en uygun denge, orta düzey koşullarda (Im60-Re60) sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Kayın, Asetilasyon, WPG, MOE, Yoğunluk, Kesme, Akustik

1 Introduction

Wood is one of the most important renewable resources and continues to play a vital role in a wide range of due to its favourable mechanical properties, aesthetic quality, and environmental advantages (He et al., 2023). Nevertheless, despite its many benefits, natural wood remains inherently susceptible to biological degradation, moisture absorption, ultraviolet (UV) radiation, and weathering, all of which considerably limit its service life particularly in outdoor applications (Petrillo et al., 2019). In order to overcome these drawbacks, improve the durability, dimensional stability, and environmental resistance of wood has become a central focus in material science and sustainable construction research.

Conventional preservation techniques, which relay heavily on chemical treatments containing chromium, copper, and arsenic compounds, have historically extended the lifetime of wood structures for several decades (Lebow et al., 2015; Momohara et al., 2021). However, growing awareness of the environmental and health hazards associated with such chemicals has driven the search for more sustainable and non-toxic methods (Emenike et al., 2024). Among the available approaches, chemical modification, particularly through altering wood's reactive hydroxyl groups, has gained as a promising strategy for enhancing moisture resistance and biological durability without the use of hazardous substances (Huang et al., 2025).

Several environmentally friendly wood modification methods have been developed to improve durability and dimensional stability without the use of hazardous substances. These include thermal modification, which enhances moisture resistance through controlled heat treatment (Hill, 2006; Sandberg et al., 2021), furfurylation based on bio-derived polymers (Sandberg et al., 2021), and resin impregnation using low-toxicity compounds (Rowell, 2012). Among these approaches, acetylation has received particular attention due to its effectiveness in reducing hygroscopicity while preserving the fundamental mechanical structure of wood.

Acetylation, one of the most extensively studied chemical modification techniques, involves the reaction of wood polymers with acetic anhydride, substituting hydrophilic hydroxyl groups with acetyl groups. This substitution significantly reduces hygroscopicity, thereby enhancing dimensional stability and resistance to decay, and making wood more suitable for outdoor and industrial applications (Hill, 2006; Yang et al., 2023). Numerous studies have consistently confirmed these improvements. For instance, Popović and Điporović-Momčilović (2012) reported a substantial reduction in swelling and shrinkage in acetylated narrow-leaved ash wood, while other research has demonstrated increased resistance to fungal attack and decay due to decreased accessibility of cell wall polymers (Slabohm et al., 2023; Belt and Awais, 2025).

Further investigations highlight that acetylation also protect lignin from photodegradation, thereby improving wood's weathering resistance (Nagarajappa et al., 2020). Surface and mechanical properties after acetylation remain critical indicators of performance. Wang et al., (2024) found that anhydride treatment increased surface roughness proportionally to the modification degree, while acetylation enhanced hardness and bending strength and only minor changes in the modulus of elasticity. Similarly, Xing et al., (2025) and Sandak et al., (2021) confirmed that higher degrees of acetylation improve resistance to environmental degradation without sustainability compromising mechanical integrity. Although, the fundamental strength and durability are significantly improved (Rowell, 2006). Hosseini and Masteri Farahani (2012) possessed that acetylation of beech wood using acetic anhydride

significantly improved dimensional stability while moderately affecting mechanical properties, depending on treatment severity.

In recent years, non-destructive testing (NDT) methods have gained importance as reliable tools for evaluating the physical and mechanical properties of wood (Oberhofnerová et al., 2016). Techniques such as flexural and longitudinal vibrations testing and ultrasonic analysis allow researchers to estimate mechanical parameters including stiffness and modulus of elasticity without damaging the material (Machado et al., 2009; Hassan et al., 2013). Among these, the dynamic modulus of elasticity (MOE), often expressed as Young's modulus, is particularly significant since it reflects the stiffness of the material and is closely related to density and acoustic behaviour (Liang and Fu, 2007; Teder et al., 2011). More recent work has demonstrated that acoustic wave velocity measurements provide valuable insight into the mechanical performance and internal structure of wood (Liu et al., 2019; Xin et al., 2022).

Despite these advantages, relatively few studies have investigated the combined effects of impregnation and reaction times during acetylation process on the mechanical and acoustical properties of beech wood, particularly when assessed through NDT techniques. Non-destructive testing methods, particularly vibration-based techniques, have been widely applied for evaluating the mechanical and acoustic properties of wood, as they allow reliable estimation of stiffness-related parameters without damaging the material (Machado et al., 2009; Oberhofnerová et al., 2016). Therefore, this study aims to evaluate the influence of varying impregnation and reaction times on the dynamic mechanical behaviour of acetylated beech wood (*Fagus orientalis* L.) using non-destructive vibration testing. The findings are expected to deepen the understanding of how processing parameters affect wood performance and to contribute to the optimization of acetylation processes for enhanced material efficiency and reliability.

2 Material and Method

2.1 Materials

Beech wood (*Fagus orientalis* L.) was obtained from Afara Gostar Wood Industries Company, sourced from the natural forests of Royan County in Mazandaran Province, northern Iran. The timber was supplied in plank form ($70 \times 460 \times 1300 \text{ mm}^3$) in an air-dried condition with a moisture content of approximately 12-15% and was cut from high-quality, defect-free beech logs suitable for experimental use. The use of air-dried timber eliminated the risk of biological staining that may occur in green wood during prolonged sample preparation and ensured consistent conditions for subsequent chemical modification.

Acetic anhydride (CH_3CO)₂O was employed as the chemical reagent for wood acetylation. Acetic anhydride used for the acetylation process was purchased from Merck Company (Darmstadt, Germany). The chemical had a molecular weight of 102.09 g/mol, a purity of 96%, a density of 1.08 g/cm³, and a melting point of -73.1 °C, and was used as received without further purification.

2.2 Preparation of samples

To ensure uniformity across all tests, specimens were prepared according to ISO 3129 international standard (1975). Each board was cut into smaller test pieces using a precision saw. For mechanical testing, specimens for flexural strength (FS) or flexural modulus (FM) were prepared with dimensions of $20 \times 20 \times 360 \text{ mm}^3$ (Table 1).

Table 1. Sample dimensions according to NDT testing

Test	FS/FM
Dimension (mm ³)	20 × 20 × 360

FS: flexural strength; FM: flexural modulus.

2.3 Impregnation procedure of samples

To determine initial dry mass, specimens were oven-dried at 103 ± 2 °C for 24 hours, and then transferred to a desiccator containing silica gel for 15 minutes to avoid moisture re-absorption. Subsequently, each specimen was weighed to the nearest 0.001 g using a digital analytical balance.

For acetylation, the oven-dried specimens were immersed in acetic anhydride for 60 or 180 minutes under ambient pressure to allow sufficient reagent uptake (Figure 1).

The samples were immersed in acetic anhydride for 60 and 180 min to allow sufficient absorption of the preservative by the wood (Figure 1).


Figure 1. Beech wood samples impregnation into the acetic anhydride

Following impregnation, the samples were wrapped in aluminium foil and subjected to a reaction stage at 103 ± 2 °C for 60 or 120 minutes, according to the experimental design (Table 2). After curing or removal from the oven, the specimens were washed several times with lukewarm water to eliminate the strong odor of acetic anhydride. The washing process was continued until no residual odor was detected, which took approximately 10-15 minutes.

Table 2. Treatment schedule for acetylation of beech wood specimens

Test (Dimension)	Impregnation Time (min)	Reaction Time (min)	Replicates	Sum of Samples
FS/FM (20×20×360 mm ³)	60	60	3	15
	60	120	3	
	180	60	3	
	180	120	3	
	Control	Control	3	

FS: flexural strength; FM: flexural modulus. The dynamic MOE values reported in this study refer exclusively to dynamic modulus of elasticity obtained from non-destructive free vibration tests. No static bending (destructive) tests were performed.

Control specimens ($n = 3$) consisted of untreated beech wood and were replicated using the same dimensions, conditioning procedure, and non-destructive testing protocol as the acetylated samples. After conditioning, all specimens underwent a final drying cycle at 103 ± 2 °C for 24 hours, followed by 15 minutes in a desiccator before final weighing.

2.4 Determination of weight percent gain (WPG)

The weight percent gain (WPG) was calculated to assess the degree of chemical uptake during acetylation. The dry weight of each specimen was measured before and after treatment using a precision balance (± 0.001 g). WPG was determined according to Eq. (1):

$$\text{WPG (\%)} = \left[\left(\frac{W_{oAT} - W_{oBT}}{W_{oBT}} \right) \right] \times 100 \quad (1)$$

Where; W_{oAT} is the oven-dry weight after treatment (g), and W_{oBT} is the oven-dry weight before treatment (g).

2.5 Non-destructive (NDT) testing

2.5.1 Longitudinal free vibration test

In the longitudinal free vibration method, the first mode node occurs precisely at the midpoint of the beam. Each specimen was supported at its midpoint and gently struck at one end in the longitudinal direction using a wooden hammer. The sound response at the opposite end was captured by a high-sensitivity microphone (Figure 2).

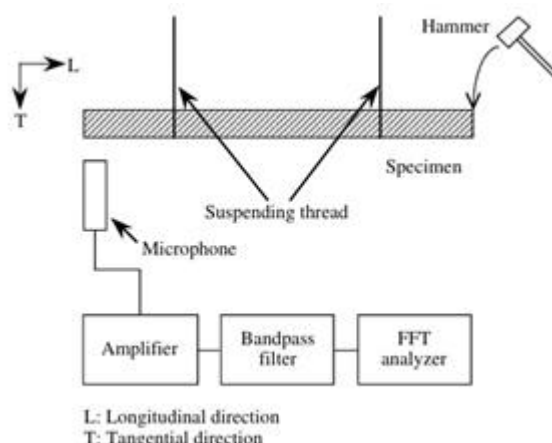


Figure 2. Schematic diagram of the experimental setup for the free-free bending vibration test (Kuboijima et al., 2022)

Recorded signals were saved in WAV format and analyzed using Audacity software to obtain frequency spectra. The first resonance frequency was identified by Fast Fourier Transform (FFT) analysis and used to calculate dynamic mechanical parameters. Data processing and parameter computation were performed using MATLAB V.7.1.

2.5.2 Flexural free vibration test

For the flexural vibration test, each specimen was supported on two elastic rubber bands to minimize damping effects (Figure 3).

In this study, the directional notation follows the orthotropic structure of wood. The longitudinal (L) direction corresponds to the fiber axis, while LR and LT denote vibration or

measurement planes involving the longitudinal-radial and longitudinal-tangential directions, respectively. These directions reflect the anisotropic nature of wood, as mechanical stiffness, shear behavior, and acoustic properties differ significantly depending on anatomical orientation. Therefore, the comparison of dynamic properties in L, LR, and LT directions provides insight into the direction-dependent effects of acetylation on beech wood.

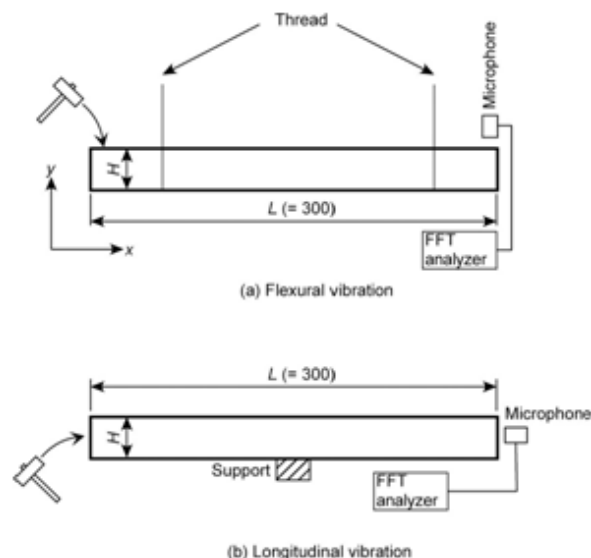


Figure 3. Diagram of the flexural (a) and longitudinal (b) vibration tests (Yoshihara, 2012)

The sample was struck at one end in the bending direction using a wooden hammer, while sound was recorded from the opposite end by a microphone. The frequency spectrum was analyzed in the same manner as in the longitudinal test. The first three resonance frequencies were used to compute the dynamic modulus of elasticity (MOE), shear modulus (G), and acoustic coefficient in the bending direction.

The resonance frequencies obtained from the frequency spectrum were used to calculate the dynamic mechanical parameters according to classical vibration theory. For the longitudinal free vibration test, the dynamic modulus of elasticity (MOE_L) was calculated using Eq. (2):

$$\text{MOE}_L = 4\rho L^2 f_1^2 \quad (2)$$

Where; ρ is the density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), L is the specimen length (m), and f_1 is the first longitudinal resonance frequency (Hz).

For the flexural free vibration test, the dynamic modulus of elasticity (MOE_F) was determined based on Timoshenko beam theory using the first three resonance frequencies, as described by Yoshihara (2012) and Brancheriau and Bailleres (2002). The shear modulus (G) was simultaneously obtained by iterative fitting of the experimental resonance frequencies to the theoretical flexural vibration model. Detailed numerical processing was performed using MATLAB software.

2.6 Data analysis

All measured parameters including FS, FM, and WPG were statistically analyzed using SPSS software (Version 24.0). Data were subjected to one-way analysis of variance (ANOVA), and mean comparisons and differences between control and acetylated samples were evaluated using Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at a 95% confidence level ($p < 0.05$) to determine the statistical significance of density changes.

3 Results and discussion

3.1 Dynamic properties — non-destructive vibration testing

3.1.1 Density

Figure 4 illustrates the relationship between density values before and after acetylation for individual specimens. Although some data points appear close to the 1:1 reference line indicating minimal change for specific samples, the overall statistical analysis demonstrates a significant increase in mean density after treatment ($p < 0.05$). Therefore, conclusions regarding density changes are based on statistical comparison of group means rather than visual inspection of individual data points.

An independent-samples Duncan's test confirmed that the mean density of acetylated specimens was significantly higher than that of the control group ($p < 0.05$), despite overlap in individual data points.

The increase in density can be attributed to the substitution of hydroxyl groups with bulkier acetyl groups and partial filling of cell-wall voids. The impregnation process promotes consistent reagent penetration, particularly under longer impregnation times (Im180), which resulted in greater WPG and reduced porosity. However, prolonged reaction times (Re120) contributed less to further mass increase, suggesting that while impregnation duration governs chemical uptake, excessive heating may not enhance densification and can even lead to partial degradation.

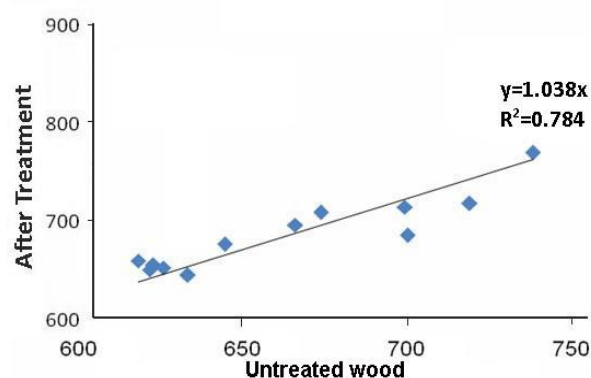


Figure 4. Density ratio (kg/m^3): Free vibration test in L, LR, and LT directions

These findings are consistent with previous studies reporting that extended impregnation increases mass gain and dimensional stability (Sandberg et al., 2021; Guo et al., 2022), while overreaction can induce thermal relaxation or surface degradation. The data therefore confirm that the impregnation stage is the primary driver of density increase, while reaction time controls structural preservation. Although numerous studies have reported the effects of acetylation on the mechanical properties of wood, direct comparison among results is often challenging due to differences in wood species, treatment severity, and testing methodology. Previous research generally indicates that acetylation leads to a slight reduction or preservation of modulus of elasticity, depending on weight percent gain (WPG) and reaction conditions (Yano et al., 1997; Rowell, 2006; Brémaud et al., 2011). In agreement with these findings, the present study also shows a moderate decrease in dynamic MOE (approximately 5%) following acetylation. However, unlike many studies that focus on a single treatment condition, the current work systematically compares different impregnation and reaction times, revealing that treatment intensity play a key role in stiffness retention. This allows

aclearer interpretation of how processing parameters govern the balance between mass gain and elastic performance in acetylated beech wood.

3.1.2 Dynamic modulus of elasticity (MOE)

Figure 5 presents the dynamic modulus of elasticity (MOE) of untreated (control) and acetylated beech wood specimens measured in the L (Figure 5a), LR (Figure 5b), and LT (Figure 5c) directions. Overall, acetylation resulted in a statistically significant reduction in dynamic MOE compared with untreated wood ($p < 0.05$). The average decrease in MOE across all vibration modes was approximately 5%, although the magnitude of reduction depended on impregnation and reaction time. Among the treatment conditions, specimens treated under Im60-Re60 exhibited the highest MOE values and did not differ significantly from untreated wood in some vibration directions, whereas Im180-Re120 samples showed the lowest MOE values and differed significantly from the control. These results indicate that increasing treatment severity leads to a measurable loss of stiffness, while moderate acetylation conditions allow better retention of elastic properties.

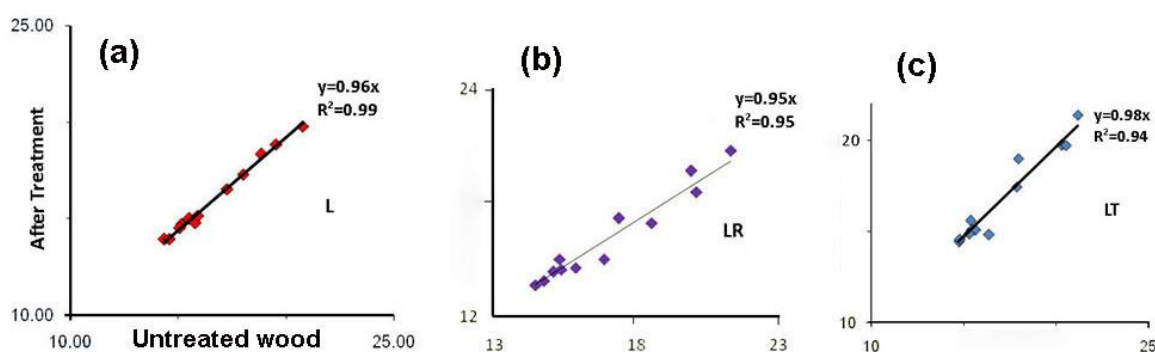


Figure 5. Relationship between the dynamic MOE of untreated (control) and acetylated beech wood obtained from the free vibration test in the L (a), LR (b), and LT (c) directions (MOE in GPa).

As indicated in Figure 6, all treatments shared the same statistical grouping (a), confirming that no significant differences in dynamic MOE were detected among the tested conditions.

Among all treatments, the Im60-Re60 condition exhibited the highest average dynamic MOE (Figures 6a, 6b, 6c, and 6d), while Im180-Re120 samples showed the lowest. This pattern suggests that both impregnation and reaction time strongly influence stiffness: longer impregnation and reaction durations increase reagent uptake but may also lead to excessive bulking or slight polymer relaxation, thereby reducing elasticity.

Regression analysis ($R^2=0.94$ to $R^2=0.99$) demonstrated a strong relationship between dynamic MOE values of untreated and treated wood samples, confirming that acetylation affects magnitude but not the anisotropic hierarchy ($L > LR > LT$). The LT vibration mode displayed the smallest reduction, whereas the longitudinal (L) direction exhibited the most pronounced decline, highlighting that the primary stiffness along the grain is more sensitive to treatment intensity.

According to Figure 6, the highest average dynamic MOE was found in non-destructive test samples treated by Im60-Re60 min times, and the lowest in samples treated by Im180-Re120 min times. As a result, increasing the impregnation and reaction times reduces the average dynamic modulus of elasticity.

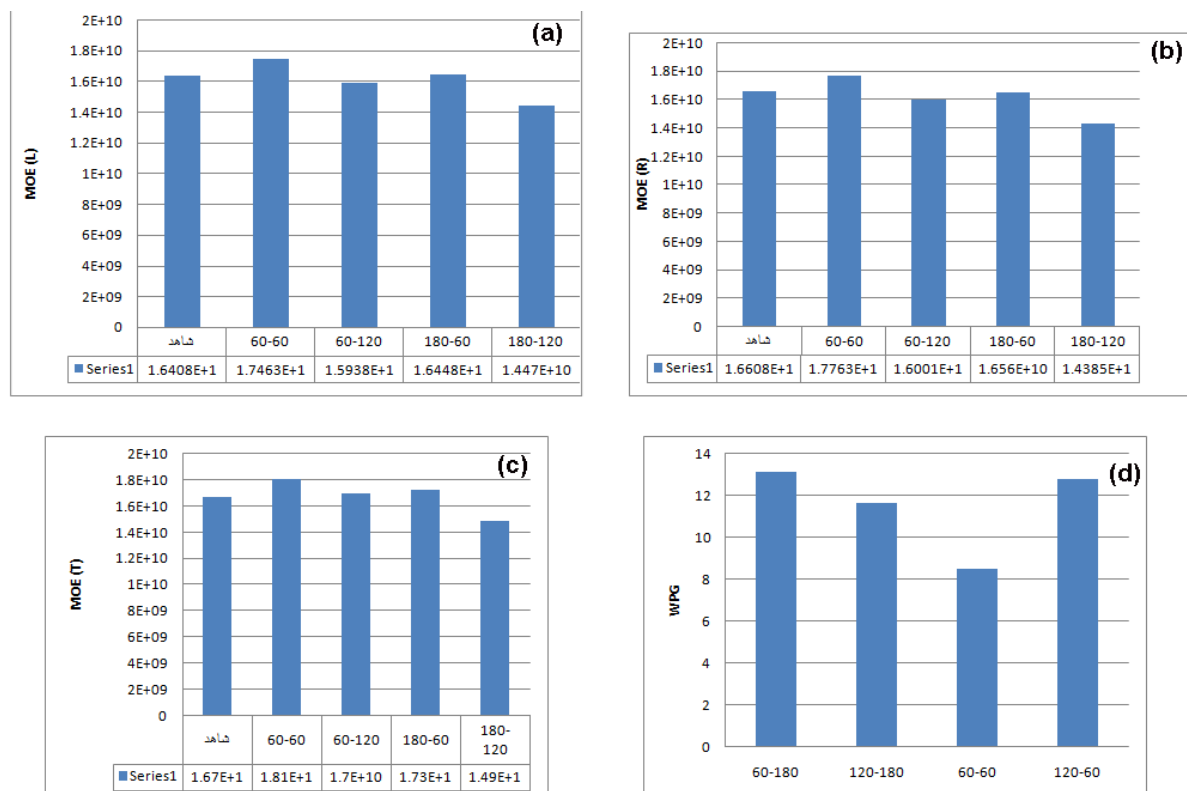


Figure 6. Average dynamic MOE of untreated and acetylated beech wood obtained from the free vibration test in the L (a), LR (b), and LT (c) directions, and mean dynamic MOE (d) (MOE in GPa). Values sharing the same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

These results are consistent with the findings of Bucur (2016) and Rowell (2012, 2013), who reported that acetylation preserves the directional dependence of stiffness while slightly reducing absolute values due to mass gain and decreased cell-wall elasticity. The observed 5% reduction in MOE underlines the importance of balancing impregnation and reaction time: moderate treatment (Im60-Re60) enhances stability while minimizing stiffness loss, whereas prolonged acetylation (Im180-Re120) can cause unnecessary mechanical deterioration. According to Figure 7, the highest WPG was observed in samples treated by Im180-Re60 min times, and the lowest in samples treated by Im60-Re60 min times.

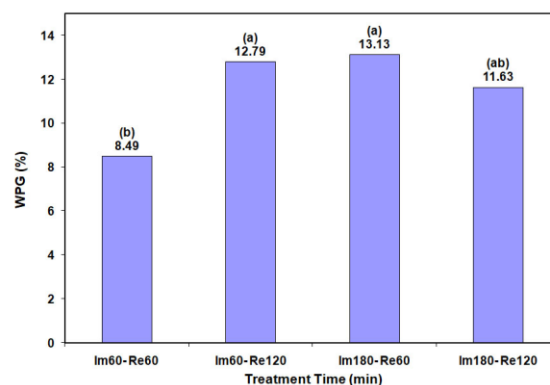


Figure 7. Average weight percent gain (WPG) of untreated and acetylated beech wood under different impregnation and reaction times; the same letters in each bar show that there is no significant difference ($p < 0.05$) between the WPC groups

3.1.3 Shear modulus

The shear modulus results from LR and LT free bending vibration tests are shown in Figure 8. The correlation between untreated and acetylated samples was moderate, with the LR direction showing a higher coefficient of determination ($R^2=0.91$) than LT ($R^2=0.74$).

In general, the shear modulus decreased in the LR direction but increased in the LT direction after acetylation. This directional contrast is attributed to the anisotropic microstructure of beech wood and the heterogeneous distribution of reagents. Longer impregnation times (Im180) promoted deeper diffusion along tangential paths, strengthening shear resistance in the LT direction, whereas prolonged reaction durations (Re120) slightly weakened radial shear behaviour due to increased brittleness and local stresses.

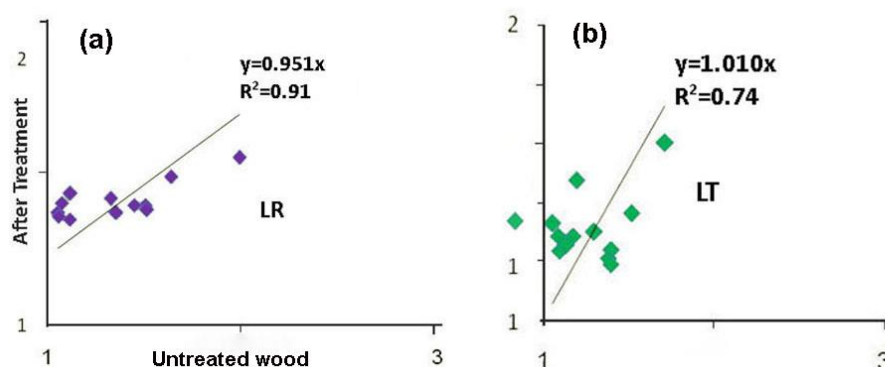


Figure 8. Ratio of shear modulus ($\text{GPa/m}^3/\text{kg}$): Free vibration test in LR (a) and LT (b) directions

These findings correspond with those of Haines and Leban (1997) and Brancheriau and Bailleres (2002), who highlighted those transverse shear moduli are highly sensitive to local density gradients and anatomical orientation. Overall, the present results show that acetylation enhances tangential shear stiffness at moderate treatment levels but that excessive exposure reduces radial shear strength. The optimal condition for maintaining shear modulus stability was observed under Im60-Re60, where reagent diffusion and structural preservation were best balanced.

3.1.4 Acoustic coefficient

Figure 9 (a, b, and c) illustrate the acoustic coefficient ratios between control and treated beech wood samples under L, LR, and LT vibration modes. The correlations between untreated and acetylated specimens were generally weak, indicating that the acoustic response of beech wood is highly sensitive to chemical modification and microstructural variation.

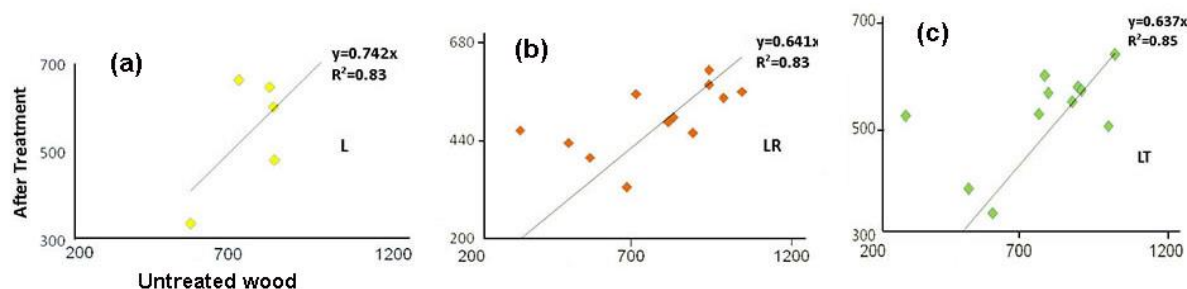


Figure 9. Ratio of acoustic coefficient: Free vibration test in L (a), LR (b), and LT (c) directions

In all vibration modes, the acoustic coefficient of acetylated samples decreased compared with the control. The longitudinal (L) direction exhibited the smallest reduction ($y=0.742x$, $R^2=0.83$), while the LR ($y=0.641x$, $R^2=0.83$) and LT ($y=0.637x$, $R^2=0.85$) directions showed more pronounced decreases. These relationships suggest a consistent yet direction-dependent decline in acoustic transmission efficiency after acetylation.

The Im180-Re120 treatment exhibited the lowest acoustic coefficient, while the Im60-Re60 condition retained the highest, suggesting that prolonged impregnation and reaction times promote excessive bulking and energy dissipation. The observed decline in acoustic performance with increasing acetylation intensity aligns with findings by Brémaud et al., (2011), Yano et al., (1997), and Wegst (2006), who emphasized that internal friction and damping behaviour are key determinants of sound propagation in chemically modified wood.

The observed changes in direction-dependent dynamic properties after acetylation can be attributed to the anisotropic structure of wood and the non-uniform interaction of acetic anhydride with different anatomical directions. Wood exhibits distinct cellular arrangements along the longitudinal (L), radial (R), and tangential (T) directions, which govern the pathways for chemical diffusion and stress transfer.

The observed changes in direction-dependent dynamic properties after acetylation can be attributed to the anisotropic structure of wood and the non-uniform interaction of acetic anhydride with different anatomical directions (Brémaud et al., 2011; Bucur, 2016).

During acetylation, acetic anhydride penetrates wood through direction-dependent pathways, leading to heterogeneous bulking of the cell wall and uneven mass-stiffness distribution (Hill, 2006).

Moreover, the substitution of hydroxyl groups with acetyl groups reduces intermolecular hydrogen bonding, resulting in decreased elastic recovery and increased internal damping, which affects stiffness and acoustic behaviour differently along the longitudinal, radial, and tangential directions (Rowell, 2006; Rowell, 2013).

Overall, the acoustic results confirm that moderate acetylation can enhance dimensional stability without severely compromising sound quality, whereas overexposure to reagents and heat significantly diminishes resonance and the acoustic coefficient.

4 Conclusions

- This study demonstrates that acetylation of beech wood using acetic anhydride under controlled impregnation and reaction times effectively alter its physical and dynamic mechanical properties. Non-destructive vibration testing proved highly effective for monitoring directional variations in stiffness, shear behaviour, and acoustic performance.
- The findings revealed that longer impregnation times (Im180) substantially increase WPG and density due to greater reagent uptake, whereas longer reaction durations (Re120) lead to reductions in the modulus of elasticity ($\approx 5\%$ decrease) and acoustic coefficient, suggesting partial deterioration of stiffness and vibrational transmission. In contrast, moderate conditions (Im60-Re60) achieved the best balance between chemical uptake, stiffness retention, and acoustic quality.
- The shear modulus results confirmed that acetylation enhances tangential shear strength (LT direction) but may reduce radial shear performance (LR direction), depending on

reaction duration. Similarly, acoustic behaviour declined across all directions, with minimal reduction observed longitudinally.

- In summary, acetylation improves the durability and dimensional stability of beech wood but requires careful optimization of impregnation and reaction times to prevent over-modification that compromises elastic and acoustic performance. The present findings confirm that non-destructive testing (NDT) offers a precise and reliable means of evaluating these effects and provides an efficient framework for optimizing industrial-scale wood modification processes.

Acknowledgments

The authors wish to thank for the support of the Department of Wood Science and Paper Technology, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran.

Author Contributions

Seyyed Khalil HosseiniHashemi: Conceptualization, Methodology, Supervision, Validation, Writing – review & editing, **Mojtaba Esfandiyar:** Data curation, Formal Analysis, Investigation, Visualization.

Funding statement

No financial support was received for the study.

Conflict of interest

We confirm that there is no conflict of interest.

References

- Belt, T., Awais, M., (2025). Progressive degradation of acetylated wood by the brown rot fungi *Coniophoraputeana* and *Rhodonia placenta*, *Wood Science and Technology*, 59, Article number: 13. DOI: [10.1007/s00226-024-01620-8](https://doi.org/10.1007/s00226-024-01620-8)
- Brancheriau, L., Bailleres, H., (2002). Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review, *Wood Science and Technology*, 36, 347-365. DOI: [10.1007/s00226-002-0143-7](https://doi.org/10.1007/s00226-002-0143-7)
- Brémaud, I., Gril, J., Thibaut, B., (2011). Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data, *Wood Science and Technology*, 45(4), 735-754. DOI: [10.1007/s00226-010-0393-8](https://doi.org/10.1007/s00226-010-0393-8)
- Bucur, V., (2016). Introduction. In: Handbook of Materials for String Musical Instruments, Springer, Cham. DOI: [10.1007/978-3-319-32080-9_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32080-9_1)
- Emenike, C.U., He, Q., Koushika, K., (2024). Pentachlorophenol and its effect on different environmental matrices: the need for an alternative wood preservative, *Sustainable Earth Reviews*, 7, Article number: 22, DOI: [10.1186/s42055-024-00090-x](https://doi.org/10.1186/s42055-024-00090-x)
- Guo, J., Wang, C., Li, C., Liu, Y., (2022). Effect of acetylation on the physical and mechanical performances of mechanical densified spruce wood, *Forests*, 13, 1620, DOI: [10.3390/f13101620](https://doi.org/10.3390/f13101620)
- Haines, D.W., Leban, J.M., (1997). Evaluation of the MOE of Norway spruce by the resonance flexure method, *Forest Products Journal*, 47, 91-93
- Hassan, K. T., Horáček, P., Tippner, J., (2013). Evaluation of stiffness and strength of Scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques, *BioResources*, 8(2), 1634-1645, DOI: [10.15376/biores.8.2.1634-1645](https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1634-1645)

- He, S., Zhao, X., Wang, E.Q., Chen, G.S., Chen, P.Y., Hu, L., (2023). Engineered wood: sustainable technologies and applications, *Annual Review of Materials Research*, 53, 1-30, DOI: [10.1146/annurev-matsci-010622-105440](https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-010622-105440)
- Hill, C.A.S. (2006). *Wood modification: chemical, thermal and other processes*, Wiley Series in Renewable Resources, John Wiley & Sons, Ltd.
- Hosseini, S.M., Mastari Frahani, M.R., (2012). Decay resistance of propionylated Iranian beech wood against white rot fungus (*Trametes versicolor*), *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 27(2), 319-325, DOI: [10.22092/ijwpr.2012](https://doi.org/10.22092/ijwpr.2012).
- Huang, C., Qin, Q., Liu, Y., Duan, G., Xiao, P., Huang, Y., Mei, C., Han, X., Han, J., He, S., Jiang, S., (2025). Physicochemical, polymeric and microbial modifications of wood toward advanced functional applications: a review, *Chemical Society Reviews*, PMID: 40926734, DOI: [10.1039/d5cs00046g](https://doi.org/10.1039/d5cs00046g)
- ISO, 3129., (1975). Wood – Sampling Methods and General Requirements for Physical and Mechanical Tests, International Standard, 4 pp.
- Kubojima, Y., Sonoda, S., Kato, H., (2022). Application of a bending vibration method without weighing specimens to the practical wooden members conditions, *Journal of Wood Science*, 68, 39, DOI: [10.1186/s10086-022-02046-1](https://doi.org/10.1186/s10086-022-02046-1)
- Lebow, S., Lebow, P., Woodward, B., Kirker G., Arango, R., (2015). Fifty-year durability evaluation of posts treated with industrial wood preservatives, *Forest Products Journal*, 65(7-8), 307-313, DOI: [10.13073/FPJ-D-15-00002](https://doi.org/10.13073/FPJ-D-15-00002)
- Liang, S. Q., Fu, F., (2007). Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber, *Journal of Forestry Research*, 18(4), 309-312, DOI: [10.1007/s11676-007-0062-4](https://doi.org/10.1007/s11676-007-0062-4)
- Liu, F., Xu, P., Zhang, H., Guan, C., Feng, D., Wang, X., (2019). Use of time-of-flight ultrasound to measure wave speed in poplar seedlings, *Forests*, 10(8), 682, DOI: [10.3390/f10080682](https://doi.org/10.3390/f10080682)
- Momohara, I., Sakai, H., Kubo, Y., (2021). Comparison of durability of treated wood using stake tests and survival analysis, *Journal of Wood Science*, 67, 63, DOI: [10.1186/s10086-021-01996-2](https://doi.org/10.1186/s10086-021-01996-2)
- Machado, J., Palma, P., Simões, S., (2009). Ultrasonic indirect method for evaluating clear wood strength and stiffness, in: *Proceedings of the 7th International Symposium on Non-destructive Testing in Civil Engineering*, Nantes, France, pp. 969-974.
- Nagarajappa, G.B., Nair, S., Srinivas, K., Rao, A.N.S., Pandey, K.K., (2020). Photostability of acetylated wood coated with nano zinc oxide, *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 22(3), 365-374, DOI: [10.4067/S0718-221X2020005000310](https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000310)
- Oberhofnerová, E., Arnetová, K., Holeček, T., Borůvka, V., Bomba, J., (2016). Determination of correlation between destructive and nondestructive test methods applied on modified wood exposed to natural weathering, *BioResources*, 11(2), 5155-5168, DOI: [10.15376/biores.11.2.5155-5168](https://doi.org/10.15376/biores.11.2.5155-5168)
- Petrillo, M., Sandak, J., Grossi, P., Sandak, A., (2019). Chemical and appearance changes of wood due to artificial weathering – Dose–response model, *J. Near Infrared Spec.*, 27(1), 26-37, DOI: [10.1177/0967033518825364](https://doi.org/10.1177/0967033518825364)

- Popović J., Điporović-Momčilović M., (2012). Influence of chemical treatment on dimensional stability of narrow-leaved ash - part one: tangential swelling, *Bull. Facul. Forestry*, 106, 151-168, DOI: [10.2298/GSF1206151P](https://doi.org/10.2298/GSF1206151P)
- Rowell, R.M., (2006). Chemical modification of wood: A short review, *Wood Material Science and Engineering*, 1(1), 29-33, DOI: [10.1080/17480270600670923](https://doi.org/10.1080/17480270600670923)
- Rowell, R.M., (2012). *Handbook of wood chemistry and wood composites* (2nd ed.), CRC Press, DOI: [10.1201/b12487](https://doi.org/10.1201/b12487)
- Rowell, R.M., (2013). Acoustical properties of acetylated wood, *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 7, 834-841.
- Sandak, A., Földvári-Nagy, E., Poohphajai, F., Diaz, R.H., Gordobil, O., Sajinèie, N., Ponnuchamy, V., Sandak, J., (2021). Hybrid approach for wood modification: Characterization and evaluation of weathering resistance of coatings on acetylated wood, *Coatings*, 11(6), 658, DOI: [10.3390/coatings11060658](https://doi.org/10.3390/coatings11060658)
- Sandberg, D., Kutnar, A., Karlsson, O., Jones, D., (2021). *Wood modification technologies: principles, sustainability, and the need for innovation*, CRC Press - Taylor & Francis, Boca Raton.
- Slabohm, M., Brischke, C., Militz, H., (2023). The durability of acetylated beech (*Fagus sylvatica* L.) laminated veneer lumber (LVL) against wood-destroying basidiomycetes, *European Journal of Wood and Wood Products*, 81, 911-921, DOI: [10.1007/s00107-023-01962-3](https://doi.org/10.1007/s00107-023-01962-3)
- Teder, M., Pilt, K., Miljan, M., Lainurm, M., Kruuda, R., (2011). Overview of some non-destructive methods for *in-situ* assessment of structural timber, in: *3rd International Conference Civil Engineering*, Latvia University of Agriculture, Latvia, pp. 137-143.
- Wang, Y., Wang, T., Crocetti, R. Wålinder, M., (2024). Effect of moisture on the edgewise flexural properties of acetylated and unmodified birch plywood: a comparison of strength, stiffness and brittleness properties, *European Journal of Wood and Wood Products*, 82, 341-355, DOI: [10.1007/s00107-023-02014-6](https://doi.org/10.1007/s00107-023-02014-6)
- Wegst, U.G.K., (2006). Wood for sound, *American Journal of Botany*, 93(10), 1439-1448. DOI: [10.3732/ajb.93.10.1439](https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1439)
- Xin, Z., Ke, D., Zhang, H., Yu, Y., Liu, F., (2022). Non-destructive evaluating the density and mechanical properties of ancient timber members based on machine learning approach, *Construction and Building Materials*, 341, 127855, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.127855](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127855)
- Xing, D., Li, Y., Pascal Kamdem, D., (2025). Improving the weathering properties of heat-treated wood by acetylation, *Holzforschung*, 79(2-3), 138-151, DOI: [10.1515/hf-2024-0098](https://doi.org/10.1515/hf-2024-0098)
- Yang, T., Mei, C., Ma, E., Cao, J., (2023). Effects of acetylation on moisture sorption of wood under cyclically changing conditions of relative humidity, *European Journal of Wood and Wood Products*, 81, 723-731, DOI: [10.1007/s00107-022-01903-6](https://doi.org/10.1007/s00107-022-01903-6)
- Yano, H., Kajita, H., Minato, K., (1997). Acoustic properties of chemically modified wood, *Holzforschung*, 51(2), 143-148, DOI: [10.1515/hfsg.1997.51.2.143](https://doi.org/10.1515/hfsg.1997.51.2.143)

Yoshihara, H., (2012). Examination of the specimen configuration and analysis method in the flexural and longitudinal vibration tests of solid wood and wood-based materials, *Forest Products Journal*, 62(3), 191-200, DOI: [10.13073/0015-7473-62.3.191](https://doi.org/10.13073/0015-7473-62.3.191)



Çam, kayın ve huş kaplama ile güçlendirilmiş kavak kontrplağın bazı mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi

Vedat Çavuş^{1*} , Bekir Cihad Bal² 

ÖZ: Kontrplak, bilinen en eski mühendislik ürünü ahşap esaslı bir malzemedir. Günümüzde, kontrplak yerine üretilen yeni malzemeler olsa da hala bazı alanlarda fazlaca kullanılmaktadır. Özellikle beton kalıbı olarak ve yüksek mukavemet aranan yerlerde kontrplak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, kavak kontrplağın çeşitli ağaç kaplamalarla birlikte kullanılarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, bu çalışmanın temel amacı olmuştur. Bu çalışmada; düşük mekanik performansa sahip kavak kontrplağın, nispeten daha yüksek performansa sahip kaplama levhaları ile güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, yüzey tabakalarında çam, kayın ve huş kaplama kullanılan kavak kontrplağın bazı seçili özellikleri araştırılmıştır. Üretilen kontrplakların eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, janka sertlik değeri, vida tutma kapasitesi, çekme-makaslama direnci ve yoğunluğu belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre, yüzey tabakalarında huş ve kayın kaplama kullanılan grupların genel olarak mekanik performansının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle yalnızca kavak kaplamadan oluşan kontrol grubuna kıyasla, yüzeylerinde huş kaplama kullanılan grupta eğilme direncinin %62.71 oranında arttığı belirlenmiştir. Elde edilen diğer mekanik özelliklerde de artış oranı yaklaşık olarak bu seviyededir. Elde edilen sonuçlar, bazı önceki çalışmalarla kıyaslandığında, cam elyafı yapılan güçlendirme çalışmalarından daha iyi sonuçlar elde edildiği söylenebilir.

Anahtar kelimeler: Kontrplak, mekanik özellikler, güçlendirme, Kavak, Kayın

Evaluation of some mechanical properties of poplar plywood reinforced with pine, beech and birch veneer

ABSTRACT: Plywood is the oldest known engineered wood material. While newer materials are being produced to replace plywood today, it is still widely used in some areas. Plywood is particularly used for concrete formwork and in applications requiring high strength. Therefore, the production of reinforced plywood has been the primary objective of some studies. This study aimed to strengthen poplar plywood, which has low mechanical performance, with relatively higher-performance veneer sheets. Selected properties of poplar plywood using pine, beech, and birch veneers as surface layers were investigated. The bending strength, flexural modulus of elasticity, Janka hardness, screw holding capacity, tensile-shear strength, and density of the produced plywood were determined. The data obtained indicated that the groups with birch and beech veneers in the surface layers generally exhibited higher mechanical performance. Compared to the control group, which used only poplar veneers, the bending strength of the group with birch veneers in the surface layers increased by approximately 50%. The increase in other mechanical properties was also approximately the same. When the results obtained are compared with some previous studies, it can be said that better results were obtained from the reinforcement studies carried out with glass fiber.

Keywords: Plywood, Mechanical properties, Reinforcement, Poplar, Beech

Makale tarihçesi: Geliş:31.10.2025, Düzeltme: 02.12.2025, Kabul:03.12.2025, Yayınlanma:26.12.2025, * vedat.cavus@ikcu.edu.tr

¹İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği, İzmir/Türkiye

²Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Malzeme Bölümü, Kahramanmaraş/Türkiye,

Atf: Çavuş, V., ve Bal, B.C., (2025), Çam, kayın ve huş kaplama ile güçlendirilmiş kavak kontrplağın bazı mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 8(2), 445-455, DOI: [10.33725/mamad.1814696](https://doi.org/10.33725/mamad.1814696)

1 Giriş

Kontrplak, farklı ağaç türlerinden üretilen ahşap esaslı kompozit malzemelerden olup, en eski mühendislik ürünü bir malzemedir. Günümüzde, kontrplak yerine kullanılabilen OSB gibi yeni malzemeler olsa bile hala bazı alanlarda fazlaca kullanılmaktadır. Diğer ahşap esaslı kompozit malzemelere kıyasla veya masif ağaç malzemeye kıyasla bazı üstün avantajlara sahiptir. Örneğin, geniş yüzeyler şeklinde elde edilebilmesi, boyutsal kararlılığının daha iyi olması, su alıp vermesi sonucu levha yapısının bozulmadan kalabilmesi ve su ile temas eden yerlerde bile (uygun tutkal kullanılırsa) kullanılabilmesi üstün özelliklerindendir. Çapraz laminasyona sahip olması levhanın dayanımını artırmakta ve yarıma direnci paralel laminasyona göre çok daha iyi olmaktadır.

Kontrplak, iğne yapraklı veya geniş yapraklı ağaç türlerinin tomruklarından elde edilen kaplama levhalarından üretilmekte olup; ahşabın yoğunluğu, ağaç türü, tutkal türü, tutkal miktarı, kaplama kalınlığı, katman sayısı, pres sıcaklığı, pres basıncı, presleme süresi ve kaplamanın kurutulma sıcaklığı gibi faktörler kontrplağın fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Bu faktörler arasında, kontrplağın üretiminde kullanılan ağaç malzemenin yoğunluğu en belirleyici parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır (Özen, 1981; Örs vd., 2002; Aydın ve Çolakoğlu, 2008; Bal ve ark., 2015).

Genel olarak, kavak, kızılçam, okaliptüs vb. hızlı büyüyen ağaç türlerinin maliyeti düşüktür, ancak bu türlerin kaplamalarından üretilen tabakalı kaplama kereste (TKK) ve kontrplak gibi malzemeler, yavaş büyüyen ağaçlardan üretilen aynı ürünlere kıyasla düşük mekanik özelliklere sahiptir (Özen 1981; Ozarska 1999; Örs ve ark., 2002; Bal ve Bektaş 2012a,b). Kavak kaplamalarından üretilen bu ürünlerin düşük kaliteli mekanik özellikleri, çeşitli güçlendirme yöntemleri kullanılarak artırılabilir. Bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin; Laufenberg ve ark., (1984) sentetik elyaf takviyeli tabakalı kaplama kerestenin (TKK) ekonomik uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Yapılan bir çalışmada fenol formaldehit reçinesi ile emprenye edilmiş kavak kaplamalı TKK'da mekanik özelliklerin ve boyutsal kararlılığın geliştiğini tespit etmişlerdir (Chui ve ark., 1994). Rowlands ve ark. (1986) 10 farklı tutkal türü ve birçok farklı formdaki cam elyaf, grafit elyaf ve Kevlar ile akça ağaçtan elde edilen lamine ahşap malzeme üzerinde denemeler yapmışlardır. Elde edilen verilere göre, en başarılı tutkal türü epoksi ve güçlendirme için en uygun elyafın cam elyaf olduğunu belirtmişlerdir. Akkurt ve ark., (2024), Kavak ve kara kızılçam kontrplağın eğilme direnci ve yük taşıma kapasitesinin yüzey kaplamalarının termo-mekanik olarak yoğunlaştırılmasının etkisini araştırmışlardır. Perçin (2023) ısıtma işlem uygulanmış ve karbon fiber ile güçlendirilmiş tabakalı kaplama kerestenin bazı özelliklerini araştırmıştır. Karri ve ark., (2022) tarafından Kenevir lifleri ve lignin-fenolik yapıştırıcılarla güçlendirilmiş kavak kontrplağın bağ kalitesini araştırılmıştır. Núñez-Decap ve ark., (2022) moniteri çamı ağacının kaplamaları ile ve karbon ve bazalt elyaf kullanarak, polivinil asetat ve epoksi reçine ile yapıştırılmış kontrplağın fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır.

Yukarıda verilen önceki çalışmalar incelendiğinde, kaplama levhaları ile üretilen TKK ve kontrplak malzemenin; cam elyafı, karbon elyafı ve doğal elyaflarla güçlendirilmesi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ayrıca, bazı çalışmalarda, düşük mekanik özelliklere sahip olan kaplama levhaları ile üretilen lamine malzemeler yüksek mekanik özelliklere sahip kaplama levhalarının dış yüzeylerinde kullanılması ile güçlendirilmiştir. Örneğin, Wong ve ark.,(1996) akasya kaplamaları ile güçlendirilmiş kauçuk ağacı esaslı TKK'nın özelliklerini araştırmıştır. H'ng ve ark., (2010), Keruing kaplamalarla güçlendirilmiş düşük yoğunluklu bazı ağaç türlerinden yapılmış TKK panellerin seçilmiş mekanik özelliklerini araştırmıştır.

Sulastiningsih ve ark., (2020), jabon ve mahoni ağaç kaplamaları ile güçlendirilmiş yağ palmyesi ağacı bazlı LVL'nin bazı mekanik özelliklerini araştırmıştır. Bir başka çalışmada ise, Kallakas ve ark., (2020) gri kızıl ağaç, kara kızıl ağaç ve titrek kavak gibi düşük performansa sahip ağaç türlerinin iç tabakalarda ve huş kaplamaların ise yüzey tabakalarında kullanılması ile üretilen kontrplakın mekanik özelliklerini araştırmıştır.

Yapılan önceki çalışmalar incelendiğinde, düşük mekanik performansa sahip olan kavak kontrplak, yüksek mekanik performansa sahip olan ağaç türlerinden elde edilen kaplama levhalarıyla güçlendirilmesi yeterince araştırılmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı; çam, kayın ve huş kaplamaları ile güçlendirilmiş kavak kontrplakın mekanik özelliklerini araştırmaktır.

2 Materyal ve Metot

2.1 Materyal

Bu çalışmada, kavak (*Populus euramericana*) çam (*Pinus sylvestris*), kayın (*Fagus orientalis* L.) ve huş (*Betula pendula*) ağaç türlerinden elde edilen kaplamalar seçilmiştir. Bu seçim, farklı yoğunluk ve mekanik özelliklere sahip türler kullanılarak kaplama türünün kavak kontrplak performansı üzerindeki etkisini sistematik olarak değerlendirme amacına dayanmaktadır. Çalışmada, düşük yoğunluklu bir çekirdek malzeme olarak kavak, yaygın bir iğne yapraklı tür temsilcisi olarak çam ve yüksek mekanik özellikleriyle bilinen sert yapraklı türler olarak kayın ve huş kullanılmıştır. Böylece düşük, orta ve yüksek yoğunluklu türlerin birlikte kullanımıyla hibrit laminasyonun etkinliği ve farklı kaplama türlerinin nihai ürün özelliklerine katkısı araştırılmıştır.

Kavak kaplamalar yaklaşık 2.7 mm ve diğerleri 1.8 mm kalınlığında kaplamalardır. Kaplama levhaları 30x30 cm boyutlarında hazırlanmış ve her levha için 5 kaplama kullanılmıştır. Çatlak, budak ve çürüme içermeyen kusursuz kaplamalar seçilmiştir. Tutkal olarak melamin-üre formaldehit tutkalı (MÜF) kullanılmıştır. Polisan Kimya Sanayi A.Ş. tarafından sağlanan, dış mekan uygulamalarına uygun, suya dayanıklı (D4 sınıfı) ticari bir melamin-üre-formaldehit (MUF) tutkalı E1 formaldehit emisyon sınıfına uygunluk göstermektedir. Üreticinin Teknik Veri Formu'na (TDF) göre MUF yapıştırıcının temel özellikleri şunlardır: 20 °C'de pH 8.5–9.5, 1.220–1.235 g/cm³ aralığında yoğunluk, 60–100 cPs viskozite, %54–56 katı madde içeriği ve ≤ %0.16 serbest formaldehit içeriği. Yüksek katı madde içeriği, presleme sırasında yeterli bağ oluşumunu garanti ederken, düşük viskozite homojen bir yapıştırıcı dağılımı sağlamıştır. Ayrıca, yapıştırıcının mükemmel su toleransı, 20-40 saniyelik akış süresi ve 100°C'de 1-2 dakikalık jel süresi göstermesi, endüstriyel uygulanabilirliğini desteklemektedir.

2.2 Kontrplakların üretilmesi

Bu çalışmada İzmir'de bir kaplama üreticisinden satın alınan toplam 4 grup kontrplak levhaları üretilmiştir. Bu gruplardan 1. Grup tüm katmanları kavak kaplamadan, 2. Grup iç katmanlarda kavak dış katmanlarda çam, 3. Grup iç katmanlarda kavak ve dış katmanlarda kayın ve 4. Grupta ise dış katmanlarda Huş ve iç katmanlarda kavak kaplama kullanılmıştır (Tablo 1). Kaplama levhaları öncelikle seçilmiş ve üretiminde kusurlu kaplamalar kullanılmamıştır. Daha sonra kaplama levhalarına tutkal bir fırça yardımı ile sürülmüştür. Kaplama yüzeylerinde yaklaşık olarak 200 ± 10 g/m² tutkal kullanılmıştır. Tutkallama işleminden sonra levhalar sıcak prese yerleştirilmiş ve 120°C'de 15 dakika boyunca 5,5 kg/cm² basınç uygulanmıştır. Her grup için 4 adet kontrplak levha üretilmiştir. Presten çıkarılan levhalar bir hafta bekletildi ve ardından test numuneleri hazırlanmıştır.

Tablo 1. Kontrplaklar gruplarında tabakalarda kullanılan kaplamalar

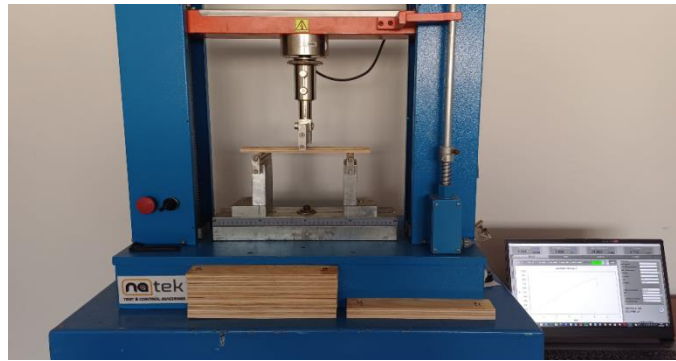
Tabaka	Grup 1	Grup 2	Grup 3	Grup 4
1. tabaka	Kavak	Çam	Kayın	Huş
2. tabaka	Kavak	Kavak	Kavak	Kavak
3. tabaka	Kavak	Kavak	Kavak	Kavak
4. tabaka	Kavak	Kavak	Kavak	Kavak
5. tabaka	Kavak	Çam	Kayın	Huş

2.3 Metot

Kontrplak deney numunelerinin eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, Janka sertlik değeri, vida tutma kapasitesi, yapışma direnci ve yoğunluk testleri sırasıyla TS EN 310 (1999), TS 2479 (1976), TS EN 13446 (2005), TS EN 314 (1998) ve TS EN 323 (1999) numaralı standartlara göre belirlenmiştir. Eğilme dayanımı deney numuneleri 10 mm kalınlığında, 50 mm genişliğinde ve 290 mm uzunluğunda levhalardan hazırlanmıştır. Her deney için her levhadan 3 adet olmak üzere toplam 12 adet deney numunesi hazırlanmıştır.

Çalışma kapsamında deneyler, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Malzeme Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır. Eğilme direnci deneyleri, Şekil 1'de görüldüğü gibi 10 kN kapasiteli universal deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Eğilme direnci deneyi sırasında üst yüzeye kuvvet uygulanmıştır. Deney hızı 5 mm/dak, destekler arasındaki mesafe 20 cm, ön yük 10 N ve deney bitiş noktası maksimum kuvvetin %75'i olarak ayarlanmıştır. Statik sertliği belirlemek için Janka deneyi yapılmıştır. Deney başlığının deney numunesine nüfuz etme derinliği 2,82 mm olarak belirlenmiştir.

Vida tutma kapasitesini belirlemek için 50x50 mm kare kesitli ve levha kalınlığında deney numuneleri hazırlanmıştır. Deneylerde 4x50 mm anma boyutlarında çinko vidalar kullanılmıştır. Vidalar deney numunesinin orta noktasından yüzeye vidalanmış ve vida tutma kapasitesi testleri sırasında ön yük değeri 10 N, test hızı 5 mm/dk ve testin son noktası kırılma veya maksimum kuvvetin %75'i olarak belirlenmiştir. Tüm deneyler 12 adet test örneği üzerinde yapılmıştır.



Şekil 1. Universal test cihazı ve eğilme direnci testinin test esnasındaki görüntüsü

2.4 İstatistik hesaplarının yapılması

Testler sonunda elde edilen veriler excel programında düzenlenmiş ve gruplar arasında fark olup olmadığı SPSS programında One-Way ANOVA testi ile belirlenmiştir. Gruplar arasında istatistiksel bir fark belirlenen gruplar için Duncan testi ile birbirlerinden farklılık gösteren gruplar belirlenmiştir. Elde edilen istatistik sonuçları çizelgelerde verilmiştir.

3 Bulgular ve Tartışma

Kontrplak test örneklerinin hava kurusu yoğunlukları hesaplanmış ve Tablo 2’de sunulmuştur. Tablo 2 incelendiğinde, grupların ortalama hava kurusu yoğunluk değerleri 425 ile 547 kg/m³ arasında sıralandığı görülmektedir. En düşük yoğunluk değeri Grup 1’de (425 kg/m³), en yüksek yoğunluk ise Grup 4’te (547 kg/m³) olarak ölçülmüştür. Grupların hava kurusu yoğunluk değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığı ANOVA testi ile belirlenmiştir. Gruplar arasındaki farkın istatistiksel olarak önemli olduğu belirlenmiştir ($P < 0,001$). Tablo 2’de verilen yoğunluk değerleri, aşağıdaki tablolarda verilen mekanik özellikler ile karşılaştırıldığında, daha yüksek yoğunluğa sahip kontrplak gruplarının (Grup 3 ve 4) daha yüksek mekanik özellikler sergilediği görülmektedir. Önceki çalışmalarda da kontrplak ve TKK gibi kaplama esaslı levhaların yoğunluğunun mekanik özellikleri etkilediği ve daha yüksek yoğunluğa sahip levhalarından daha yüksek mekanik özellikler elde edildiğini bildirmiştir (Örs ve ark., 2002; Aydın ve Çolakoğlu 2008; Bal 2014; Bal 2016). Ayrıca, yoğunluğun yanı sıra, tutkal türü, tutkal miktarı, pres basıncı, lif yapısı, ağaç türü ve ağaç hücrelerinin dağılımı da mekanik özellikler üzerine etkili olabilir.

Tablo 2. Yoğunluk testi verileri, ANOVA önem düzeyi ve Duncan testi sonuçları

		Grup 1	Grup 2	Grup 3	Grup 4	Önem düzeyi
Yoğunluk	x	425 A	494 B	538 C	547 C	***
(kg/m ³)	ss	41	20	26	25	

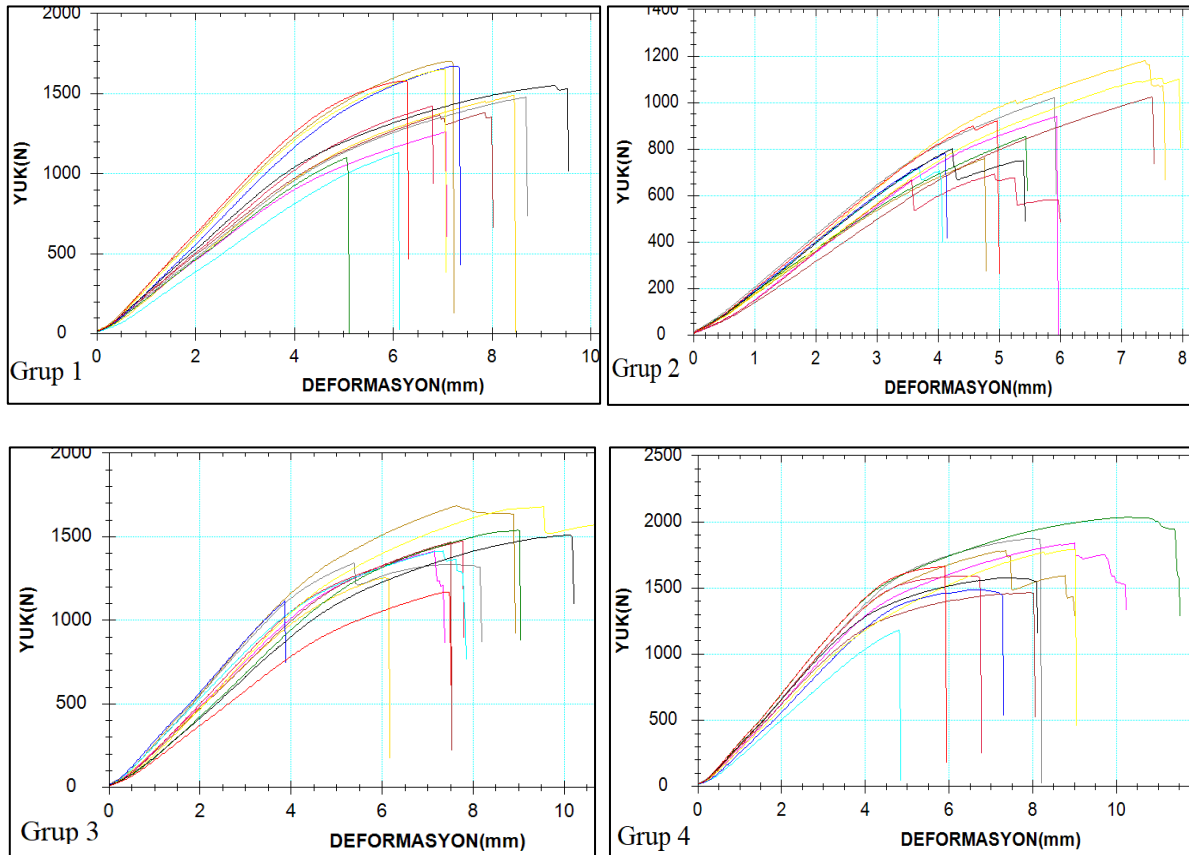
Eğilme direnci testine ait veriler Tablo 3’te verilmiştir. Tabloda görülebileceği gibi, deney örneklerinin eğilme direnci değerleri 47 ile 77 N/mm² arasında değişmektedir. Gruplar arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlıdır ($P < 0,001$). En yüksek eğilme direnci değeri Grup 4’te, en düşük ise Grup 1’de ölçülmüştür. Grup 1 ile karşılaştırıldığında Grup 4’te eğilme direncindeki artış yaklaşık % 63 olmuştur. Elastikiyet modülü için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. En düşük elastisite modülü Grup 1’de 5192 N/mm², en yüksek elastisite modülü ise Grup 4’de 8945 N/mm² olarak bulunmuştur. Gruplar arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlıdır ($P < 0,001$). Kontrol grubu (Grup 1) ile karşılaştırıldığında Grup 4’ün elastikiyet modülündeki artış yaklaşık olarak %72 olmuştur. Deney gruplarında kullanılan çam, kayın veya huş kaplamanın kavak kaplamaya oranı 5’te 2’dir. 5 kaplama panelinden 3’ü kavaktan, ikisi ise diğer ağaç türlerinden yapılmıştır. Buna rağmen deney gruplarının eğilme performansı kontrol grubuna göre istatistiksel olarak anlamlı şekilde iyileşmiştir. Bu konuda daha önce yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin Literatürde, kaplama düzenlemesinin TKK elemanlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar, kavak ve kayın TKK kirişlerin masif ahşap elemanlara kıyasla daha yüksek eğilme mukavemeti ve elastikiyet modülü sunduğunu ortaya koymuştur (Strickler ve Pellerin, 1971; Burdurlu ve ark., 2007). Bu bağlamda, birinci sınıf kaplamalarla üretilen TKK kirişlerin eğilme mukavemetinin, ikinci veya üçüncü sınıf kaplamalarla üretilen TKK kirişlere göre %6 oranında daha yüksek olabildiği tespit edilmiştir (Viguier ve ark., 2018). Diğer çalışmalarda ise, lif oryantasyonu ölçümü yoluyla kayın kaplamaların sınıflandırılması sayesinde, elastikiyet modülündeki farkın %29’a varabildiği belirlenmiştir (Marx ve Moody, 1982). Ayrıca, kontrplak levhalarının cam veya karbon elyaf ile güçlendirilmesiyle ilgili önceki çalışmalarda, güçlendirme ile eğilme direncindeki artış %50’nin altında kalmıştır (Bal ve ark., 2015; Kramár ve ark., 2019; Auriga ve ark., 2020; Lohmus ve ark., 2021; Núñez ve ark., 2022). Bu çalışmalara göre; mekanik performansı

düşük kaplama levhalarla üretilen kontrplak levhaların, mekanik performansı yüksek kaplama levhalarla güçlendirilmesi, sentetik elyaflarla güçlendirilmesinden daha iyi sonuçlar vermiştir.

Tablo 3. Eğilme direnci testi verileri, ANOVA önem düzeyi, Duncan testi sonuçları

Test		Grup 1	Grup 2	Grup 3	Grup 4	Önem düzeyi
Eğilme direnci (N/mm ²)	x	47.2 A	49.6 A	71.5 B	76.8 B	***
	ss	8.4	8.6	11.7	11.3	
Elastikiyet modülü (N/mm ²)	x	5192 A	6488 B	8090 C	8945 D	***
	ss	721	748	740	829	
Eğilmede Deformasyon (mm)	x	7.3 B	5.8 A	8.0 B	8.1 B	**
	ss	1.2	1.3	2.1	1.9	

Kontrplak gruplarının eğilme direnci esnasında elde edilen verilerle yük-deformasyon eğrileri elde edilmiş ve Şekil 2’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, gruplardaki test örneklerinin maksimum kırılma yükleri (Fmax) ve maksimum deformasyon değerleri yaklaşık olarak görülebilmektedir. Bu grafiklere göre, grup test örneklerinin maksimum 1200-1700 N aralığında ve grup 4 test örneklerinin ise yaklaşık olarak 1500-2000 N gibi yüklere kadar dayanabildiği görülebilir. Ayrıca, test sonunda kırılma meydana gelinceye kadar test örneklerinin dayanabildiği maksimum deformasyon miktarı ise Grup 1’de 5-9 ve Grup 4’te ise 5-16 mm deformasyon değerine kadar dayanabildikleri görülebilir.



Şekil 2. Eğilme direnci testine ait yük-deformasyon grafikleri

Statik sertlik testine ait veriler, gruplar arasında fark olup olmadığını gösteren ANOVA testi sonuçları ve diğerlerinden farklı olan grupları gösteren Duncan testi sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde, en küçük sertlik değeri tamamen kavak kaplamalardan üretilen Grup 1'de ve en büyük sertlik değeri ise yüzey tabakalarında huş kaplama kullanılan Grup 4'de elde edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda da sertlik değerinin ağaç türüne veya odun yoğunluğuna bağlı olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır (Kontinen ve Nyman, 1977; Niemz ve Stübi, 2000; Scharf ve ark., 2022; Neyses ve ark., 2017; Perçin ve Altınok, 2019; Zhou ve ark., 2019; Mania ve ark., 2022; Kallakas ve ark., 2024). Bu bağlamda, çalışmada elde edilen sertlik değerleri, literatürde bildirilen değerlerle uyumlu olup, yüzey tabakası türünün kontrplak mekanik performansı üzerindeki belirleyici rolünü desteklemektedir.

Tablo 4. Statik sertlik değeri testi verileri, ANOVA önem düzeyi, Duncan testi sonuçları

		Grup 1	Grup 2	Grup 3	Grup 4	Önem düzeyi
Statik sertlik (N/mm ²)	x	19.0 A	24.0 B	27.1 BC	27.6 C	***
	ss	2.2	4.2	4.4	3.9	

Vida tutma kapasitesi testi verileri, ANOVA önem düzeyi ve Duncan testi sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde, vida tutma kapasitesi değerlerinin 29 ile 34 N/mm² aralığında ölçüldüğü görülebilir. En düşük vida tutma kapasitesi tamamen kavak kaplamalardan üretilen Grup 1'de ve en yüksek vida tutma kapasitesi ise yüzey tabakalarında huş kaplama kullanılan Grup 4'de elde edilmiştir. Hem vida tutma kapasitesi ve hem de diğer mekanik özelliklerde elde edilen sonucu etkileyen en önemli faktörlerden birisi kontrplak levhasının ve dolayısıyla kontrplağı oluşturan kaplama levhalarının yoğunluğudur. Elde edilen yoğunluk testi sonuçlarına göre en küçük yoğunluk kavak kontrplakta ve en büyük yoğunluk ise grup 4'de yüzeylerinde huş kaplama kullanılan kontrplakta ölçülmüştür. Daha önce yapılan TKK veya kontrplak üzerine çalışmalarda da levha yoğunluğu veya kaplama yoğunluğunun vida tutma kapasitesini etkilediği belirlenmiştir (Bukari, 2012; Maleki ve ark., 2017; Ribeiro ve ark., 2018; Gutknecht ve Macdougall, 2019). Literatürde, dış katmanları sert ağaç kaplamalardan oluşan kontrplakların vida tutma kapasitesinin yüksek olduğu ve bu durumda düşük yoğunluklu ağaç türlerinden üretilen kaplamaların iç tabakalarda kullanılabileceği bildirilmiştir (Neyses ve ark., 2007).

Tablo 5. Vida tutma kapasitesi testi verileri, ANOVA önem düzeyi, Duncan testi sonuçları

		Grup 1	Grup 2	Grup 3	Grup 4	Önem düzeyi
Vida tutma Kapasitesi (N/mm ²)	x	29.3 A	32.9 B	35.3 B	34.4 B	**
	ss	1.6	3.2	4.1	4.0	

Çalışma kapsamında üretilen kontrplakların tamamının iç kısımlarında kullanılan kaplama kavak kaplamadır. Bu nedenle, kontrplak gruplarının yapışma direnci sadece kavak olan kaplamalar arasında ölçülmüştür. Yapılan çekme-makaslama testi sonunda yapışma direnci 2.3 N/mm² olarak hesaplanmıştır. İlgili standartta, 1 N/mm² nin üzerinde olan çekme-makaslama direnci testleri için odun kırılması-tutkal kırılması yüzdelerinin hesaplanmasına gerek olmadığı belirtilmiştir. Bu nedenle, çekme makaslama testi sonunda test örneklerinde kırılma yüzdeleri hesaplanmamıştır. Kavak kaplamalar üzerinde ölçülen yapışma direncinin bu 2.3 N/mm² değerle iyi bir yapışma performansı gösterdiği söylenebilir.

4 Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, yüzey tabakalarında çam, kayın ve huş kaplama kullanılan kavak kontrplağın bazı seçili özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen verilere göre;

- Kontrplak yoğunluğunun, kullanılan kaplama levhasının yoğunluğundan etkilendiği belirlenmiştir. En yüksek yoğunluk, yüzey tabakalarında huş kaplamalarının kullanıldığı kontrplakta elde edilmiştir.
- Eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, vida tutma kapasitesi ve statik sertlik testi sonunda elde edilen verilere göre, en küçük mekanik performans tamamen kavak kaplamaların kullanıldığı kontrplak grubu olan Grup 1’de ve en büyük ise yüzeylerinde huş kaplamanın kullanıldığı Grup 4’te elde edilmiştir.
- Üretilen kontrplak levhalarının yapışma performansı, çekme-makaslama testi ile belirlenmiştir. İç tabakalarda sadece kavak kaplama kullanıldığı için, elde edilen yapışma direnci kavak-kavak kaplama yapışma direncini göstermektedir. Elde edilen çekme-makaslama direnci 1 N/mm² nin üzerindedir.
- Kavak kontrplağın yüzey tabakalarında huş gibi yüksek yoğunluklu sert ağaç kaplamalar kullanılarak mekanik performansta önemli iyileşmeler sağlanabileceği ve bu yöntemin düşük yoğunluklu ağaç türlerinin yapısal uygulamalarda kullanım potansiyelini artırabileceği sonucuna varılmıştır.
- Endüstriyel ölçekte, düşük maliyetli kavak kontrplağın yapısal uygulamalarda kullanım alanını genişletmek için huş ve kayın gibi sert ağaç kaplamalarla hibrit üretim yöntemlerinin benimsenmesi önerilmektedir. Gelecek çalışmalarda, farklı ağaç türleri, kaplama kalınlıkları ve tutkal sistemleri ile optimize edilmiş hibrit kontrplakların uzun vadeli performansı ve ekonomik fizibilitesi araştırılabilir.

Yazar Katkısı

Vedat Çavuş: Kavramsallaştırma, Metodolojinin belirlenmesi, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma, inceleme ve düzenleme. **Bekir Cihad Bal:** Kavramsallaştırma, Metodolojinin belirlenmesi, Araştırmanın yapılması, Analizlerin yapılması, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma, inceleme ve düzenleme.

Finansal destek beyanı

Finansal destek alınmamıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemiştir.

Kaynaklar

- Akkurt, T., Rohumaa, A., Kallakas, H., Scharf, A., and Kers, J., (2024). Enhancing the bending strength, load-carrying capacity and material efficiency of aspen and black alder plywood through thermo-mechanical densification of face veneers, *Construction and Building Materials*, 450, 138555, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.138555](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138555)
- Auriga, R., Gumowska, A., Szymanowski, K., Wronka, A., Robles, E., Ocipka, P., and Kowaluk, G., (2020). Performance properties of plywood composites reinforced with carbon fibers, *Composite Structures*, 248, DOI: [10.1016/j.compstruct.2020.112533](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112533)
- Aydın, İ., and Çolakoğlu, G., (2008). Variations in bending strength and modulus of elasticity of spruce and alder plywood after steaming and high temperature drying, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 15(5), 371-374, DOI: [10.1080/15376490801977692](https://doi.org/10.1080/15376490801977692)

- Bal, B. C., and Bektas, İ., (2012a). The effects of some factors on the impact bending strength of laminated veneer lumber, *BioResources*, 7(4), 5855-5863.
- Bal, B. C., and Bektas, İ., (2012b). The effects of wood species, load direction, and adhesives on bending properties of laminated veneer lumber, *BioResources*, 7(3), 3104-3112.
- Bal, B. C., (2014). Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glass fiber, *Construction and Building Materials*, 51, 9-14, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2013.10.041](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.041)
- Bal, B. C., Bektaş, İ., Mengeloğlu, F., Karakuş, K., and Demir, H. Ö., (2015). Some technological properties of poplar plywood panels reinforced with glass fiber fabric, *Construction and Building Materials*, 101, 952-957, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2015.10.152](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.152)
- Bal, B. C., (2016). Some technological properties of laminated veneer lumber produced with fast-growing Poplar and Eucalyptus, *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(3), 413-424. DOI: [10.4067/S0718-221X2016005000037](https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000037)
- Bukari, M. H., (2012). *The performance of structural screws in Canadian glulam*, McGill University.
- Burdurlu, E., Kılıç, M., İlce, A. C., and Uzunkavak, O., (2007). The effects of ply organization and loading direction on bending strength and modulus of elasticity in laminated veneer lumber (LVL) obtained from beech (*Fagurs orientalis* L.) and Lombardy poplar (*Populus nigra* L.), *Construction and Building Materials*, 21(9), 1720-1725, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2005.05.002](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.05.002)
- Chui, Y. H., Schneider, M. H., and Zhang, H. J., (1994). Effects of resin impregnation and process parameters on some properties of poplar LVL, *Forest Products Journal*, 44(7-8), 74-79
- Gutknecht, M. P., and Macdougall, C., (2019). Withdrawal resistance of structural self-tapping screws parallel-to-grain in common Canadian timber species, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46, 952–962, DOI: [10.1139/cjce-2018-0374](https://doi.org/10.1139/cjce-2018-0374)
- H'ng, P. S., Paridah, M. T., and Chin, K. L., (2010). Bending properties of laminated veneer lumber produced from Keruing (*Dipterocarpus* sp.) reinforced with low density wood species, *Asian Journal of Scientific Research*, 3(2), 118-125.
- Kallakas, H., Akkurt, T., Scharf, A., Mühl, F., Rohumaa, A., and Kers, J., (2024). The effect of hardwood veneer densification on plywood density, surface hardness, and screw withdrawal capacity, *Forests*, 15(7), 1275, DOI: [10.3390/f15071275](https://doi.org/10.3390/f15071275)
- Kallakas, H., Rohumaa, A., Vahermets, H., and Kers, J., (2020). Effect of different hardwood species and lay-up schemes on the mechanical properties of plywood, *Forests*, 11(6), 649, DOI: [10.3390/f11060649](https://doi.org/10.3390/f11060649)
- Karri, R., Lappalainen, R., Tomppo, L., and Yadav, R., (2022). Bond quality of poplar plywood reinforced with hemp fibers and lignin-phenolic adhesives, *Composites Part C: Open Access*, 9, 100299, DOI: [10.1016/j.jcomc.2022.100299](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100299)
- Kontinen, P., and Nyman, C., (1977). Hardness of wood-based panel products and their coatings and overlays, *Paper and Timber*, 9, 531–545.

- Kramár, S., Trcala, M., Chitbanyong, K., Král, P., and Puangsin, B., (2019). Basalt-fiber-reinforced polyvinyl acetate resin: a coating for ductile plywood panels, *Materials*, 13(1), 49, DOI: [10.3390/ma13010049](https://doi.org/10.3390/ma13010049)
- Laufenberg, T. L., Rowlands, R. E., and Krueger, G. P., (1984). Economic feasibility of synthetic fiber reinforced laminated veneer lumber (LVL), *Forest Products Journal*, 34(4), 15-22.
- Lohmus, R., Kallakas, H., Tuhkanen, E., Gulik, V., Kiisk, M., Saal, K., and Kalamees, T., (2021). The effect of prestressing and temperature on tensile strength of basalt fiber-reinforced plywood, *Materials*, 14(16), 4701, DOI: [10.3390/ma14164701](https://doi.org/10.3390/ma14164701)
- Maleki, S., Kazemi Najafi, S., Ebrahimi, G., and Ghofrani, M., (2017). Withdrawal resistance of screws in structural composite lumber made of poplar (*Populus deltoides*), *Construction and Building Materials*, 142, 499–505, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.03.039](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.039)
- Mania, P., Hartlieb, K., Mruk, G., and Roszyk, E., (2022). Selected properties of densified hornbeam and paulownia wood plasticised in ammonia solution, *Materials*, 15(14), 4984, DOI: [10.3390/ma15144984](https://doi.org/10.3390/ma15144984)
- Marx, C. M., and Moody, R. C., (1982). Effects of lumber width and tension laminated quality on the bending strength of four ply laminated beams, *Forest Products Journal*, 32(1), 45-52.
- Neyses, B., Rautkari, L., Yamamoto, A., and Sandberg, D., (2017). Pre-treatment with sodium silicate, sodium hydroxide, ionic liquids or methacrylate resin to reduce the set-recovery and increase the hardness of surface-densified Scots pine, *iForest*, 10, 857–864, DOI: [10.3832/ifer2385-010](https://doi.org/10.3832/ifer2385-010)
- Niemz, P., and Stübi, T., (2000). *Investigations of hardness measurements on wood-based materials using a new universal measurement system*, Proceedings of the Symposium on Wood Machining, Properties of Wood and Wood Composites Related to Wood Machining.
- Núñez-Decap, M., Barra-Rodríguez, Y., Opazo-Carlsson, C., Moya-Rojas, B., Vidal-Vega, M., and Opazo-Vega, A., (2022). Use of carbon and basalt fibers with adhesives to improve physical and mechanical properties of plywood, *Applied Sciences*, 12(10), 5114, DOI: [10.3390/app12105114](https://doi.org/10.3390/app12105114)
- Ozarska, B., (1999). A review of the utilization of hardwoods for LVL, *Wood Science and Technology*, 33, 341-351.
- Örs, Y., Çolakoğlu, G., Aydın, İ., and Çolak, S., (2002). Kayın, okume ve kavak soyma kaplamalarından farklı kombinasyonlarda üretilen kontrplakların bazı teknik özelliklerinin karşılaştırılması, *Politeknik Dergisi*, 5(3), 257-265.
- Özen, R., (1981). *The investigations on the effects of various factors on physical and mechanical properties of plywood*, Karadeniz Technical University.
- Perçin, O., (2023). Isıl işlem uygulanmış karbon fiber ile güçlendirilmiş lamine kaplama kerestenin (LVL) hava kurusu yoğunluk ve liflere paralel basınç direncinin belirlenmesi, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 104-114, DOI: [10.33725/mamad.1268729](https://doi.org/10.33725/mamad.1268729)
- Perçin, O., and Altunok, M., (2019). The effects of heat treatment, wood species and adhesive types on screw withdrawal strength of laminated veneer lumbars, *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 19(2), 152-163, [10.17475/kastorman.625819](https://doi.org/10.17475/kastorman.625819)

- Ribeiro, M. L., Del Menezzi, C., Siqueira, M. L., and de Melo, R. R., (2018). Effect of wood density and screw length on the withdrawal resistance of tropical wood, *Nativa*, 6, 402–406, DOI: [10.31413/nativa.v6i4.5638](https://doi.org/10.31413/nativa.v6i4.5638)
- Rowlands, R.E., Deweghe, R.P.V., Laufenberg, T.L., Krueger, G.P., (1986). Fiber-reinforced wood composites, *Wood and Fiber Science*, 18(1), 39-57.
- Scharf, A., Neyses, B., and Sandberg, D., (2022). Hardness of surface-densified wood, Part 1: Material or product property? *Holzforschung*, 76, 503–514, DOI: [10.1515/hf-2021-0151](https://doi.org/10.1515/hf-2021-0151)
- Strickler, M. D., and Pellerin, R. F., (1971). Tension proof loading of finger joint for laminated beams, *Forest Products Journal*, 21(2), 10-15.
- Sulastiningsih, I. M., Trisatya, D. R., and Balfas, J., (2020). Some properties of laminated veneer lumber manufactured from oil palm trunk, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 935(1), 012019, DOI: [10.1088/1757-899X/935/1/012019](https://doi.org/10.1088/1757-899X/935/1/012019)
- TS 2479, (1976). Odunun statik sertliğinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 310, (1999). Ahşap esaslı levhalar- Eğilme dayanımı ve eğilme elastikiyet modülünün tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 314-1 (1998), Kontrplak Kaplanmış-yapışma Kalitesi -Bölüm 1: Deney Metotları, TSE, Ankara.
- TS EN 323, (1999). Ahşap esaslı levhalar-birim hacim ağırlığının tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 13446, Ahşap esaslı levhalar-Bağlayıcıların geri çıkma kapasitesinin tayini, TSE-Ankara. 2005,
- Viguier, J., Bourgeay, C., Rohumaa, A., Pot, G., and Denaud, L., (2018). An innovative method based on grain angle measurement to sort veneer and predict mechanical properties of beech laminated veneer lumber, *Construction and Building Materials*, 181, 146-155, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.06.050](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.050)
- Wong, E. D., Razali, A. K., and Kawai, S., (1996). Properties of rubber wood LVL reinforced with acacia veneers, *Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute Kyoto University*, 83, 8-16.
- Zhou, Q., Chen, C., Tu, D., Zhu, Z., and Li, K., (2019). Surface densification of poplar solid wood: Effects of the process parameters on the density profile and hardness, *BioResources*, 14(2), 4814-4831, DOI: [10.15376/biores.14.2.4814-4831](https://doi.org/10.15376/biores.14.2.4814-4831)



Circular design strategies in interior architecture: rethinking furniture design through reuse, recycling, and waste materials

Emine Banu Burkut^{1*} 

ABSTRACT: The aim of this study is to systematically examine the use of reuse, recycling, and natural or waste materials in the furniture design process in interior architecture. The research was based on systematic literature review and content analysis methods. Within the scope of the study, current publications on focal points such as "reuse," "recycling," "waste," "environmental furniture design," and "ecological approaches" were identified in the scientific literature. These publications were systematically analyzed and visualized using scientific maps. A rigorous systematic review was conducted during the literature analysis process using the PRISMA approach. The content analysis utilized VOSviewer and Biblioshiny to uncover significant themes and concepts associated with furniture design. The results highlighted key terms such as "furniture design," "wooden furniture," "recycling," "sustainability," "circular economy," "sustainable design," "wood products and waste," "recycled polypropylene," "3D printing techniques," "textile waste," "environmental impacts," interior architecture applications," "eco-design," and "green production" stand out. In conclusion, current academic publications hold considerable potential for enhancing scientific visibility and uncovering new research opportunities.

Keywords: Interior Architecture, Furniture, Design, Recycle, Waste Material

İç mimarlıkta döngüsel tasarım stratejileri: yeniden kullanım, geri dönüşüm ve atık malzemelerle mobilya tasarımı yeniden düşünmek

ÖZ: Bu çalışmanın amacı, iç mimarlıkta mobilya tasarım sürecinde yeniden kullanım, geri dönüşüm ve doğal veya atık malzemelerin kullanımını sistematik olarak incelemektir. Araştırma, sistematik literatür taraması ve içerik analizi yöntemlerine dayanmaktadır. Çalışma kapsamında, bilimsel literatürde "yeniden kullanım", "geri dönüşüm", "atık", "çevre dostu mobilya tasarımı" ve "ekolojik yaklaşımlar" gibi odak noktalarına ilişkin güncel yayınlar belirlenmiştir. Bu yayınlar sistematik olarak analiz edilmiş ve bilimsel haritalar kullanılarak görselleştirilmiştir. Literatür analizi sürecinde, PRISMA yaklaşımı kullanılarak titiz bir sistematik inceleme yürütülmüştür. İçerik analizi, mobilya tasarımıyla ilgili önemli temaları ve kavramları ortaya çıkarmak için VOSviewer ve Biblioshiny araçlarını kullandı. Bulgulara göre, mobilya tasarımıyla ilgili çeşitli temalar ve kavramlar öne çıkmaktadır. Sonuçlar "mobilya tasarımı", "ahşap mobilya", "geri dönüşüm", "sürdürülebilirlik", "döngüsel ekonomi", "sürdürülebilir tasarım", "ahşap ürünler ve atıklar", "geri dönüştürülmüş polipropilen", "3B baskı teknikleri", "tekstil atıkları", "çevresel etkiler" iç mimarlık uygulamaları", "eko-tasarım" ve "yeşil üretim" gibi önemli anahtar kelimeler öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, güncel akademik yayınlar, bilimsel görünürlüğü artırma ve yeni araştırma fırsatlarını ortaya çıkarma konusunda önemli bir potansiyele sahiptir.

Anahtar kelimeler: İç mimarlık, Mobilya, Tasarım, Geri Dönüşüm, Atık Malzemeler

1 Introduction

In interior architecture education, furniture design processes are undergoing a radical transformation in line with the principles of sustainability and the circular economy. The impact of traditional design approaches on natural resources, waste management issues, and environmental degradation in furniture design necessitates the adoption of circular models focused on "reuse, recycling, and regeneration." In this context, innovative practices such as the repurposing of waste materials in furniture design, the development of modular systems, and material identities support resource efficiency and ecological balance. Moreover, especially with the widespread adoption of the circular economy, scientific research on the use of materials such as recycled textiles, wood, and plastic in furniture design offers a solution for the transition to sustainable production models.

The aim of this study is to present current publications in the field, to present a conceptual and normative perspective, and to contribute to the education of interior architecture, interior design, furniture and decoration departments through student studies after providing information about current studies. Historically, with the rise of environmental awareness towards the end of the 20th century, the use of recycled materials in furniture design gained importance. This approach, initially experimental and artistic, has since taken sustainable products into consideration in the 2000s. Furthermore, the *3R (Reduce, Reuse, Recycle)* principles have been integrated into furniture design (Baik and Lee, 2010; Pralat et al., 2024). In recent studies, significant innovations such as 3D printing technologies, composite materials, and waste recycling and reuse have added a new dimension to the field of furniture design (Fauzan et al., 2022; Elessawy et al., 2024).

1.1 Theoretical framework and conceptual background

In recent years, literature reviews on sustainability, sustainable furniture, and recycled materials have yielded a comprehensive body of work and a variety of methodological and theoretical approaches. Significant research in this area focuses particularly on circular economy practices, the use of recycled furniture, and promoting the widespread adoption of environmentally friendly interior design. Specifically, when examining the theoretical framework and conceptual background of interior architecture, which is the focus of this research, the following emerge. There are current publications on interior architecture, interior design and furniture design. Sustainability and environmental awareness, green/eco-friendly materials and applications.

It emphasizes the use of recycled, renewable, and low-environmental-impact materials. This includes materials such as sustainable wood, bamboo, recycled plastic, and natural fibers (Hayles, 2015; Hartini et al. 2020; Mrinalini et al., 2023; Elessawy et al., 2024). Energy efficiency and ecological design. It likely focuses on ecological design strategies that improve the energy performance of indoor spaces, promote passive heating/cooling methods, and enhance healthy indoor air quality (Celadyn, 2019). Circular economy, it may discuss the transition from the "take-make-dispose" model to the "circular economy" model, where furniture can be repaired, reused, and recycled (Marsahala et al. (2023). User experience and ergonomics, it may have investigated the functionality, comfort, and responsiveness of furniture and spaces to user needs. Ergonomics, anthropometry, and user-centered design methodologies fall within this scope (Máté; 2007; Li, 2016; Trela, 2017).

The influence of human-centered and psychological design impact of design on human health, well-being, and emotional state is significant. Lubonja and Ovidiu (2019), Celadyn (2019), and Afifi (2025) explore how design elements affect human psychology, offering

deeper insights into the connection between thoughtful design and its effects on mental and emotional well-being. They focus on how color, light, texture, and spatial arrangement can help reduce stress, increase focus, and support overall well-being. This approach is particularly prominent in spaces such as hospitals, offices, and homes. Technology and digital integration digital production techniques: publications such as may address the opportunities created by technologies such as 3D printing, CNC milling, and robotic production in furniture and interior design. These technologies enable the production of personalized and complex forms. Smart furniture and spaces: more recent studies may explore furniture and interior solutions that integrate with IoT (Internet of Things) and smart home systems, adapting to user needs. Virtual and augmented reality (VR/AR): These technologies are transforming the design process by allowing designers and customers to experience and modify spaces and furniture in currently (Hayles, 2015; Afifi, 2025).

Recent studies draw attention to the intersection of interior design and sustainability, showcasing practical solutions and applications that resonate with broader ecological goals. Research delves into the pedagogical aspects of incorporating recycled materials into educational practices, examining how curricula can integrate sustainability and foster environmental awareness among students. This includes both theoretical frameworks and hands-on approaches that enhance learning environments (Al-Saud et al., 2024). Similarly, some investigate how recycled furniture merges aesthetics with functionality while addressing sustainability in design education, emphasizing innovative transformations of waste materials into usable furniture pieces and recycled materials (Ali et al., 2013; Grotowska et al., 2024; Afifi, 2025; Ibrahim and Putri, 2025), waste plastic and furniture (Bal et al., 2023).

In particular, the studies explore circular economy principles, waste minimization, and lean manufacturing processes, integral to achieving eco-friendly production standards in furniture design. These works further discuss examples like recycled wood scraps being repurposed into furniture, alongside advancements such as the application of recycled materials in 3D printing technology for interior components (Pringle et al., 2018; Ellessawy et al., 2024). Environmental benefits such as reduced waste and improved resource efficiency form key outcomes highlighted in this body of research (Ramadan, 2023; Zheng et al., 2025). Also, from theoretical analyses to commercial implementations, the collective research underscores the growing demand for sustainable practices within interior design and furniture production. This includes fostering ecological responsibility in design studios and furniture construction courses through circular economy teachings and supporting eco-conscious innovations. Particular emphasis has been placed on 3D printing filaments derived from recycled inputs, which enable functional and sustainable design solutions while catering to environmentally driven market trends (Hayles, 2015; Pringle et al., 2018; Lin et al., 2020). These developments contribute significantly to the attainment of sustainability goals while objectives but also reflect a harmonious blend of economic viability and social responsibility. Academic initiatives, such as integrating sustainability into interior design curricula, are fostering the development of second nature sections in reporting and instilling sustainable thinking in architectural projects. Case studies demonstrate the widespread adoption of recycled materials in interior design, from affordable housing solutions to high-end management facilities, highlighting the importance of recycled materials as a significant trend in sustainable development.

The aim of this study is to use recycled furniture in interior architecture to raise awareness of the principles of recycling and circular economy. It seek to encourage environmentally friendly conscious interior design by demonstrating how waste materials can be transformed

into creative and innovative furniture designs. In addition, this study provides a comprehensive theoretical background and literature review of circular approaches to furniture design, reuse, recycling, and waste materials in interior architecture, including lists of existing publications and conceptual images and scientific maps.

2 Material and method

The methodology and working scheme of this research are explained step by step below. The research was based on systematic literature review and content analysis methods. A systematic review was conducted during the literature analysis process using the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) approach (Figure 1). This approach is widely preferred by numerous researchers in contemporary studies (Butdisuwan et al., 2024; Geçimli, 2024). After reviewing using the PRISMA protocols, the metadata has been carefully verified to ensure completeness (Figure 2). The research method is explained step by step (Figure 3).

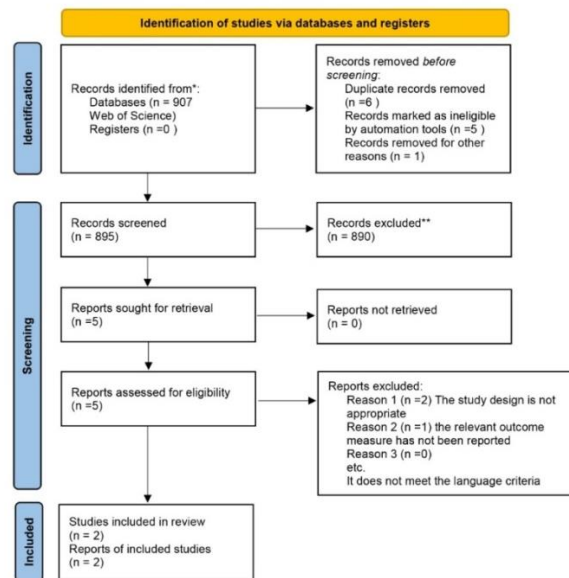


Figure 1 Research methodology for PRISMA flow diagram (Prepared by the author according to PRISMA 2020 protocols.)

Metadata	Description	Missing Counts	Missing %	Status
DT	Document Type	0	0.00	Excellent
SO	Journal	0	0.00	Excellent
LA	Language	0	0.00	Excellent
PY	Publication Year	0	0.00	Excellent
WC	Science Categories	0	0.00	Excellent
TI	Title	0	0.00	Excellent
TC	Total Citation	0	0.00	Excellent
AU	Author	1	0.10	Good
CR	Cited References	10	1.00	Good
C1	Affiliation	11	1.10	Good
RP	Corresponding Author	14	1.40	Good
AB	Abstract	19	1.90	Good
DI	DOI	85	8.50	Good
DE	Keywords	87	8.70	Good
ID	Keywords Plus	382	38.20	Poor

Figure 2 Completeness of metadata; description, missing counts, missing %, status. (created by author R Studio software)

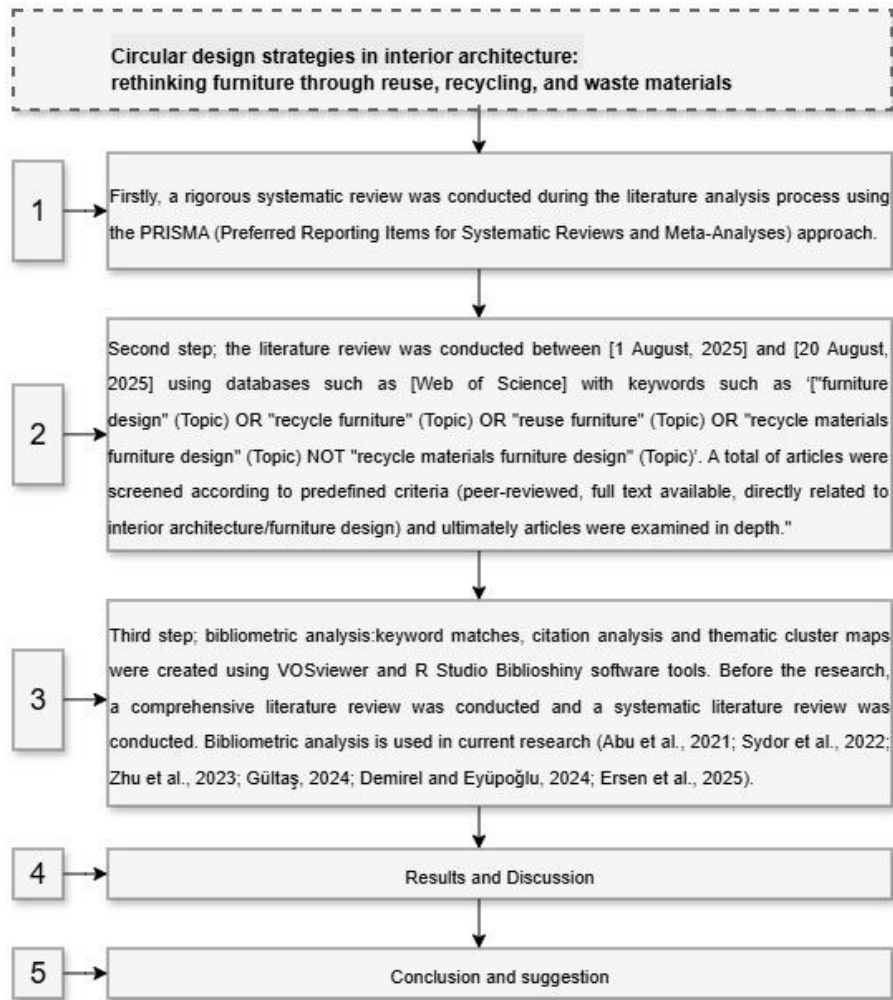


Figure 3 Research method are explained step by step

3 Results and Discussion

The first section, which presents conceptual findings on circular approaches to reuse, recycling, and waste materials in furniture design, presents conceptual approaches, theoretical outcomes, visual outcomes, and lists of relevant trends, active topics, and concepts. The second section includes findings from student projects prepared within the furniture design and construction course and presentations of student work.

3.1. Conceptual findings of circular approaches to reuse, recycling and waste materials in furniture design

The results in the table below, conceptual findings of circular approaches to reuse, recycling and waste materials in furniture design, are given according to general search criteria in the Web of Science database. Furthermore, as seen as Figure 3 specific applications and industry concerns are captured with keywords like "waste management" and "school furniture," illustrating practical implementations within the broader realm of furniture design and production.

In additionally; "smart furniture", "urban furniture", "market research", "multifunctional furniture", "textile waste", "environmental impact", "lean manufacturing", "upholstery

furniture”, “ergonomic design”, “industrial design”, “total quality management (tqm)”, “urban areas”, “product design”, “interior design”, “architecture”, “eco-design”, “children”, “recycling”, “upcycling”, “innovative design”, “waste management”, “circular economy”, and “green manufacturing” (Figure 4). In additionally, thematic cluster (co-word/overlay analysis) keyword networks are centered on three core clusters. Design principles: design for disassembly, modularity, repairability, adaptability. Material and process: recycled plastics, reclaimed wood, bio-based composites, textile waste, remanufacturing, CNC/3D printing. Use and impact: LCA/LCC, user participation, maker culture, social innovation, heritage/craft.

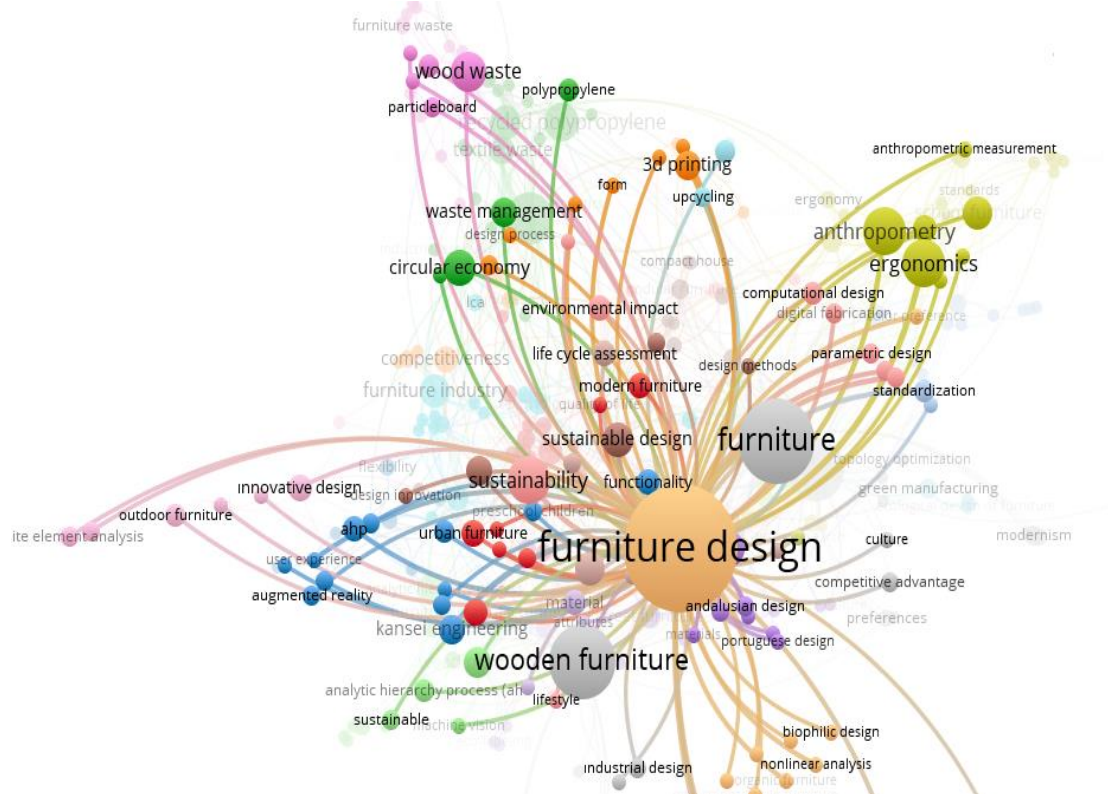


Figure 4 Visualization of furniture design (created by author using VOSviewer software)

The Figure 4 was created by the author using VOSviewer software (Figure 4). The chosen keywords encompass a broad spectrum of themes in furniture design and sustainability. Core focus areas are highlighted through terms like "furniture design," "furniture," and "wooden furniture. The list also integrates sustainability concepts such as "recycling," "sustainability," "circular economy," and "sustainable design," underscoring the importance of environmentally friendly practices. Functional and user-centered design considerations are addressed through technical keywords like "ergonomics," "anthropometry," and "mechanical properties." Material aspects are represented by terms such as "wood," "wood waste," "wood products," and "recycled polypropylene," while "3D printing" and "supply chain" shed light on modern manufacturing techniques and logistics.

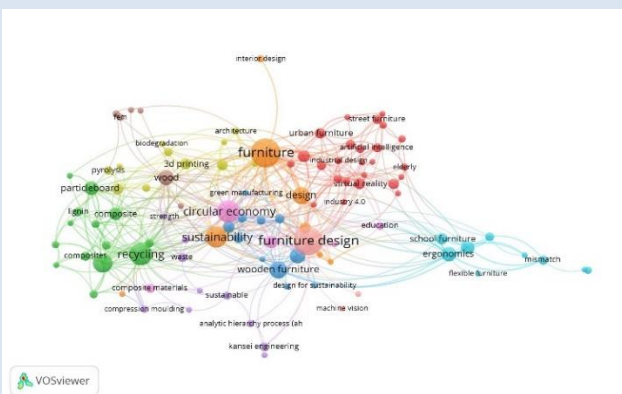
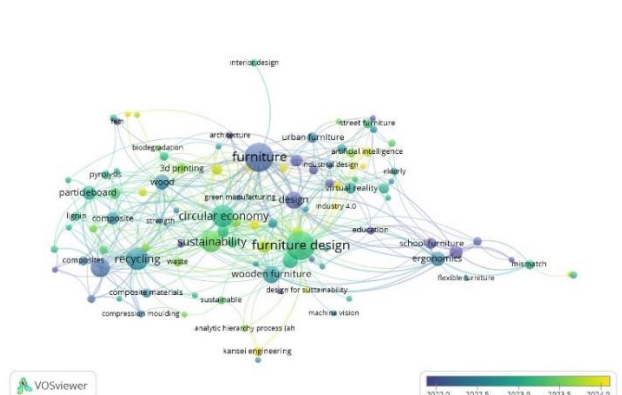
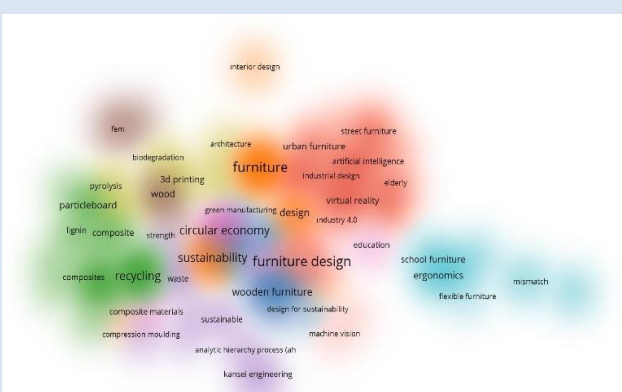
Table 1 provides a comprehensive overview of scholarly publications themes of related to reuse, recycling, and the utilization of waste materials within the context of furniture design. These publications were thoroughly read and a content analysis was conducted. This analysis evaluated the keywords used by the authors in their publications. This analysis focused specifically on the keywords selected by authors, which serve to highlight reveal current and future trends in furniture design scholarship. Furthermore, this examination facilitates the

identification of gaps in the existing body of literature, with particular emphasis on the disciplines of interior architecture, interior design, and furniture design and construction.

Table 1 Table of relevant publications furniture design (Web of Science, 2025)

Authors	Article Title	Year	Source Title
Wang et al.,	"Research on Sustainable Furniture Design Based on Waste Textiles Recycling"	2023	"Sustainability"
Galluccio et al.,	"Design for Resilient Post-Disaster Wood Waste Upcycling: The Katrina Furniture Project Experience and Its Legacy in a Digital Perspective"	2024	"Buildings"
Sari et al.,	"Assessing Environmental Impact and Eco-Efficiency of Wood Waste Gallon Holders Using Life Cycle Assessment"	2025	"Journal of Ecological Engineering"
Xue and Chen	"Strategies for Applying Shape Grammar to Wooden Furniture Design: Taking Traditional Chinese Ming-Style Recessed-Leg Table as an Example"	2024	"Bioresource"
Suandi et al.,	"A Review on Sustainability Characteristics Development for Wooden Furniture Design"	2022	"Sustainability"
Lähtinen et al.,	"Designers' Wooden Furniture Ecodesign Implementation in Scandinavian Country-Of-Origin (COO) Branding"	2014	"Journal of Product and Brand Management"
Abjaghhou et al.,	"Incorporation of Wooden Furniture Wastes in Fired Clay Bricks for Improved Thermal Insulation: A Feasibility Study"	2020	"Waste and Biomass Valorization"
Liu	"Brief Analysis on Green Design and Manufacture of Furniture Products"	2013	Manufacturing Process and Equipment
Knosková and Garasová	"Consumer Perception of Product Features in Buying Process of Wooden Furniture"	2021	"Ad Alta-Journal of Interdisciplinary Research"
Zhang	"Rational Consideration on Package Design of Wooden Furniture"	2011	"Mechatronics and Intelligent Materials"
Yang and Zhu	"Recycling and Value-added Design of Discarded Wooden Furniture"	2021	"Bioresources"
Zheng et al.,	"Measures and Suggestions for Recycling and Reuse of Waste Wooden Furniture"	2025	"Wood Material Science and Engineering"
Zhang et al.,	"Research on the Recyclable Design of Wooden Furniture Based on the Recyclability Evaluation"	2023	"Sustainability"

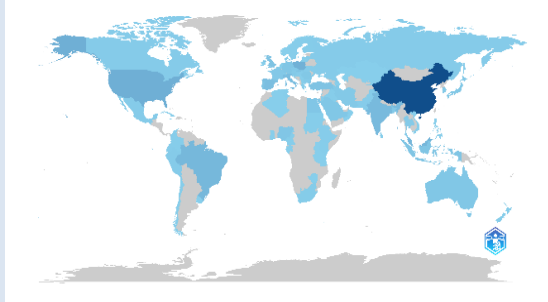
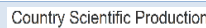
Table 2. Scientific mappings and descriptions of data

Scientific Mapping	Description
	This visual is a bibliometric network visualization map created with VOSviewer software tools. The map shows the co-occurrence relationships of keywords in academic publications on topics such as furniture design, sustainability, and circular economy. Orange cluster: furniture, interior design, architecture, green manufacturing, urban furniture, street furniture. Green cluster: recycling composite materials wood particleboard biodegradation bio-composite, compression molding
	This visual is a bibliometric overlay visualization map created with VOSviewer software tools. Yellow cluster; circular economy 3D printing biodegradable materials green manufacturing. Red cluster: artificial intelligence industry 4.0 smart furniture IoT smart city. Blue cluster: ergonomics, school furniture mismatch, and flexible furniture design for sustainability
	This visual is a bibliometric density visualization map created with VOSviewer software tools.
	This visual is a bibliometric word cloud visualization map of author keywords created using R Studio Bibliometrix and Biblioshiny software tools.

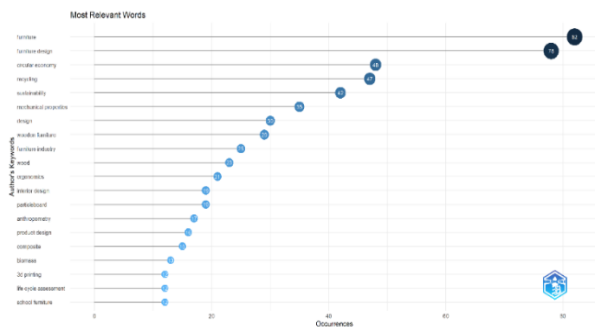
Continuation of Table 2



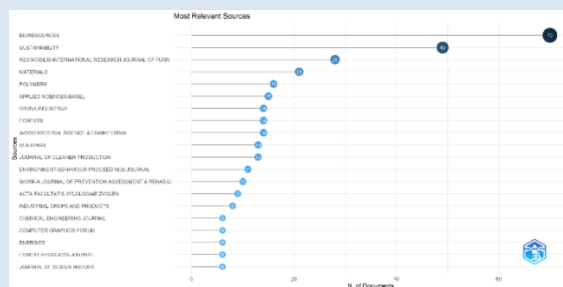
This visual is a bibliometric word cloud visualization map of author titles created using R Studio Bibliometrix Biblioshiny software tools.



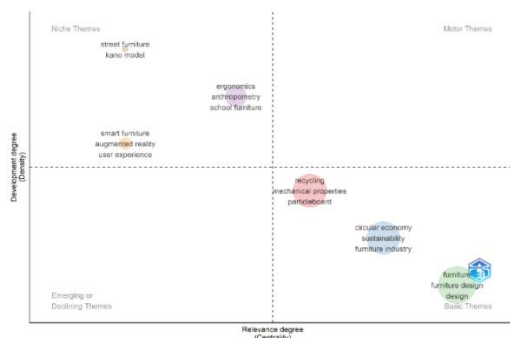
This visual is a country scientific production visualization map in world created with R Studio Bibliometrix Biblioshiny software tools. This visual is a world science map showing countries' levels of scientific production within the scope of bibliometric analysis. The map is color-coded according to the publication outlet for countries in a specific research field (likely “sustainable furniture design” or “furniture-ergonomics-recycling”).



Most relevant words graphic created by R Studio Bibliometrix Biblioshiny software. According to this graph, furniture design, circular economy, recycling, sustainability, mechanical properties, design, wooden furniture, the furniture industry, wood, ergonomics, and interior design. Author's keywords occurrences graphic.



The most relevant sources graphic was generated using R Studio's Bibliometrix and Biblioshiny software. Based on this graphic, the key sources identified include Bioresources, Sustainability, Res Mobilis - International Research Journal of Furniture, Materials, Polymers, Applied Sciences-Basel, Drvna Industrija, Forests, Wood Material Sciences & Engineering, Building, Journal of Cleaner Production, and Environmental Behavior Proceedings Journal.



This diagram and analysis support bibliometric studies, highlighting themes in a research field. The axes show theme development (density) and relevance (centrality). Motor Themes (Upper Right): recycling, mechanical properties, particleboard, circular economy, sustainability, furniture industry. Basic Themes (Lower Right): foundation of the field, focusing on design and furniture design, though less advanced or specialized. Niche Themes (Upper Left): street furniture, canoe model, ergonomics, anthropometry, school furniture, smart furniture, augmented reality, user experience.

4. Conclusion and suggestion

In this study, a review of existing literature reveals that while numerous studies exist on the application of recycled and natural materials in furniture design, the application of circular approaches to reuse, recycling, and waste materials within interior design curricula has been insufficiently explored. This research provides a concrete example of these issues. Future research is recommended to focus on the research, design, and production dimensions. According to the findings of this study, considering furniture design on a global scale and addressing waste, recycling, reuse, and the circular economy in collaboration with education, industry, and production will become important elements in the future. In this era of global resource depletion and increased environmental importance, the contribution of this study to the field will be immense.

- Unlike previous studies, this one thoroughly explores the systematic literature review, the creation of scientific concept maps using visuals, and the development of new and innovative furniture designs based on this data.
- This study provides a solid theoretical and applied research framework for future researchers. In the future, the methodology of this research could be refined, a new study could be prepared, or this study could be collaboratively translated into a furniture production process.
- Furniture design competitions, which were not included in this study, are also an important research topic. Today, furniture design competitions emphasize waste, recycling, and reuse. They offer both students and professionals the opportunity to present their original work. The aim is to provide research ideas that will contribute to the field of science in the future.
- This study conducts an in-depth analysis of design approaches centered on sustainability and environmental impact, utilizing a systematic literature review and concept mapping techniques. By incorporating these principles into innovative furniture design, the work establishes a robust framework for transforming theoretical insights into practical applications.
- It also explores the integration of digital design and manufacturing technologies, such as digital fabrication and 3D modeling, within furniture design processes. This investigation emphasizes the potential of these technologies to enhance design adaptability, production efficiency, and opportunities for customization, setting a strong foundation for further research in the field.

Additionally, the study underscores the necessity of strengthening interdisciplinary connections between materials science and furniture design. Areas such as the experimental use of innovative and alternative materials, including smart materials, composites, and natural fibers, are identified as critical directions for future research and development.

Acknowledgement

This research was conducted as part of the Furniture Design and Construction IV course, held during the spring semester of the 2024-2025 academic year within the Department of Interior Architecture, Faculty of Art, Design, and Architecture at Fatih Sultan Mehmet Vakıf University.

Acknowledgment is extended to the students for their invaluable contributions to this study. Additionally, sincere appreciation is directed toward the companies specializing in recycling, zero-waste practices, upcycling, and ecological furniture, whose expertise greatly enriched the

course. Gratitude is also extended to the Environmental Protection and Control Directorate of Zeytinburnu Municipality and Istanbul Metropolitan Municipality for their thoughtful contributions and support throughout the course preparation process.

Author Contributions

Emine Banu Burkut: Conceptualization (developing the research idea and objectives), Determining the methodology, Conducting the research, Conducting analyses, Data curation, Resources, Auditing, Validation, Visualization, Drafting the article, Writing, reviewing and editing the article

Conflict of interest statement

The authors declare no conflict of interest.

References

- Abjaghrou, H., Bourret, J., Tessier-Doyen, N., Fassier, M., Bruneaux, M. A., Lacanilao, A., and Peyratout, C., (2020). Incorporation of wooden furniture wastes in fired clay bricks for improved thermal insulation: A feasibility study, *Waste and Biomass Valorization*, 11(12), 6943-6951, DOI: [10.1007/s12649-020-00933-6](https://doi.org/10.1007/s12649-020-00933-6)
- Abu, F., Gholami, H., Saman, M. Z. M., Zakuan, N., Sharif, S., and Streimikiene, D., (2021). Pathways of lean manufacturing in wood and furniture industries: A bibliometric and systematic review, *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(4), 753-772, DOI: [10.1007/s00107-021-01713-2](https://doi.org/10.1007/s00107-021-01713-2)
- Al-Saud, K., AlAli, R., Al Saud, A. M., Aboulela, A. S., Shehab, R. T., Moneim, D. A. A., and Hamid, A. E. M., (2024). Exploring the aesthetic and functional aspects of recycled furniture in promoting sustainable development: an applied approach for interior design students. *Sustainability*, 16(10), 4003, DOI: [10.3390/su16104003](https://doi.org/10.3390/su16104003)
- Afifi, A. H., (2025). Sustainable interior design and its role in promoting furniture recycling culture as an artistic approach, *Arts and Architecture Journal*, 6(1), 167-182, DOI: [10.21608/aa.2025.397245.1135](https://doi.org/10.21608/aa.2025.397245.1135)
- Ali, N. S., Khairuddin, N. F., and Zainal Abidin, S., (2013). Upcycling: Re-use and recreate functional interior space using waste materials. DS 76: Proceedings of EandPDE 2013, the 15th International Conference on Engineering and Product Design Education, Dublin, Ireland, 05-06.09. 2013 (pp. 798-803), DOI: [10.13140/2.1.2643.3603](https://doi.org/10.13140/2.1.2643.3603)
- Baik, E., and Lee, M. H., (2010). Research on cases of furniture design with the idea of sustainability applied-Mainly on Lohas' 3R (Recycle, Reuse, Reduce), *Journal of the Korea Furniture Society*, 21(5), 392-402.
- Bal, B. C., Altuntaş, E., and Narlıoğlu, N., (2023). Some selected properties of composite material produced from plastic furniture waste and wood flour, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 6(2), 233-244. DOI: [10.33725/mamad.1384214](https://doi.org/10.33725/mamad.1384214)
- Butdisuwan, S., Hossain, S., Zaffar, H., Ameen, M., and Islam, M. S. (2024). Sustainable architecture and the role of cyber-physical systems: A bibliometric analysis, *Bangladesh Journal of Multidisciplinary Scientific Research*, 9(4), 39-48.
- Calabrese, M., (2012). Recycling Furniture: The ecological, economic and social benefits, Student Theses 2001-2013. 33. https://fordham.bepress.com/environ_theses/33

- Celadyn, M., (2019). Interior architectural design for adaptive reuse in application of environmental sustainability principles, *Sustainability*, 11(14), 3820, DOI: [10.3390/su11143820](https://doi.org/10.3390/su11143820)
- Daian, G., and Ozarska, B., (2009). Wood waste management practices and strategies to increase sustainability standards in the Australian wooden furniture manufacturing sector, *Journal of Cleaner Production*, 17(17), 1594-1602. DOI: [10.1016/j.jclepro.2009.07.008](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.07.008)
- Demirel, S., and Eyüboğlu, H., (2024). A bibliometric evaluation on furniture joints studies, *Turkish Journal of Forestry*, 25(1), 56-63. DOI: [10.18182/tjf.1389049](https://doi.org/10.18182/tjf.1389049)
- Elessawy, N. A., El Shakhs, A., El-Saka, M. F., Youssef, M. E., Youssef, B. A., and Ali, M. A. M., (2024). Sustainable and eco-friendly 3D printing filament fabricated from different recycled solid wastes and evaluate its impact on interior and furniture design, *Results in Engineering*, 23, 102428. DOI: [10.1016/j.rineng.2024.102428](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102428)
- Ersen, N., Akyüz, İ., and Akyüz, K. C., (2024). Bibliometric analysis: an example of journal publishing on furniture and wood materials, *Duzce University Journal of Science and Technology*, 12(3), 1557-1571, DOI: [10.29130/dubited.1300897](https://doi.org/10.29130/dubited.1300897)
- Fauzan, M., Lubis, S. M. Y., and Darmawan, S., (2022). Karakteristik komposit hdpe recycle berpenguat serat bambu untuk panel board furniture, *Syntax Literate; Jurnal Ilmiah Indonesia*, 7(8), 10800-10814. DOI: [10.36418/syntax-literate.v7i8.9230](https://doi.org/10.36418/syntax-literate.v7i8.9230)
- Fekry Gamal, D., (2022). Concept of circular economy in ECO-friendly furniture design, *Journal of Design Sciences and Applied Arts*, 3(1), 80-89. DOI: [10.21608/jdsaa.2021.101152.1140](https://doi.org/10.21608/jdsaa.2021.101152.1140)
- Galluccio, G., Deal, B., Brooks, R., Russo Ermolli, S., Rigillo, M., Perriccioli, M., ... and Bevilacqua, C., (2024). Design for resilient post-disaster wood waste upcycling the katrina furniture project experience and its “legacy” in a digital perspective, *Buildings*, 14(7), DOI: [10.3390/buildings14072065](https://doi.org/10.3390/buildings14072065)
- Geçimli, M., (2024). Sustainable Interior Design/Architecture Researches After Sustainable Development Goals: a Bibliometric Analysis, *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 14(1), 546-564, DOI: [10.20488/sanattasarim.1506512](https://doi.org/10.20488/sanattasarim.1506512)
- Gültaş, M. P., (2024). Sustainability management practices in the furniture sector: an analytical study, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 7(2), 250-265. DOI: [10.33725/mamad.1568828](https://doi.org/10.33725/mamad.1568828)
- Grotowska, M., Olenska, S., Gruszczynska, J., and Beer, P., (2025). Analysis of the properties of upcycled wood waste for sustainable furniture production, *Sustainability*, 17(14), 6368. DOI: [10.3390/su17146368](https://doi.org/10.3390/su17146368)
- Haidiezul, A. H. M., Gopal, S., Aiman, A. F., Syafiq, A. M., Ishak, M. I., Shahrin, S., ... and Dahlan, N. D., (2018, November). Design and development of furniture using recycle waste materials embedded with resin. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2030, No. 1, p. 020035). AIP Publishing LLC. DOI: [10.1063/1.5066676](https://doi.org/10.1063/1.5066676)
- Hartini, L., Wibawa, B., Situmorang, R., and Raissa, F., (2020). Interior design of national library with environmentally sustainability materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1007 (1), 012004. IOP Publishing, DOI: [10.1088/1757-899X/1007/1/012004](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1007/1/012004)

- Hartini, S., Wicaksono, P. A., Rizal, A. M. D., and Hamdi, M., (2021, February). Integration lean manufacturing and 6R to reduce wood waste in furniture company toward circular economy. *IOP conference series: materials science and engineering*, 1072, (1), 012067. IOP Publishing, DOI: [10.1088/1757-899X/1072/1/012067](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1072/1/012067)
- Hayles, C. S., (2015). Environmentally sustainable interior design: A snapshot of current supply of and demand for green, sustainable or Fair Trade products for interior design practice, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(1), 100-108. DOI: [10.1016/j.ijsbe.2015.03.006](https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.03.006)
- Hubbe, M. A., (2023). Reuse, a neglected "r" word in "reduce, reuse, and recycle", *BioResources*, 18(4), DOI: [10.15376/biores.18.4.6737-6740](https://doi.org/10.15376/biores.18.4.6737-6740)
- Ibrahim, N.A., and Putri, S. A., (2025). Integration of design for disassembly method using recycled mahogany material in modular furniture, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 8(1), 88-99, DOI: [10.33725/mamad.1674449](https://doi.org/10.33725/mamad.1674449)
- Kim, K. B., Chung, D. S., and Jang, J. S., (2020). A study of product design using recycled materials, *International Journal of Advanced Smart Convergence*, 9(1), 70-81, DOI: [10.7236/IJASC.2020.9.1.70](https://doi.org/10.7236/IJASC.2020.9.1.70)
- Knošková, L., and Garasová, P., (2021). Consumer perception of product features in buying process of wooden furniture, *Ad Alta: Journal of Interdisciplinary Research*, 11(2). ISSN 1804-7890.
- Lähtinen, K., Alina Samaniego Vivanco, D., and Toppinen, A., (2014). Designers' wooden furniture ecodesign implementation in Scandinavian country-of-origin (COO) branding, *Journal of Product and Brand Management*, 23(3), 180-191, DOI: [10.1108/JPBM-07-2013-0354](https://doi.org/10.1108/JPBM-07-2013-0354)
- Liu, F., (2013). Brief analysis on green design and manufacture of furniture products, *Advanced Materials Research*, 694, 3269-3272. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.694-697.3269](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.694-697.3269)
- Li, J., (2016). The use of renewable materials in interior design. In *2016 International Conference on Economics, Social Science, Arts, Education and Management Engineering* (pp. 956-963). Atlantis Press. DOI: [10.2991/essaeme-16.2016.191](https://doi.org/10.2991/essaeme-16.2016.191)
- Lin, C. W. R., Chen, M. T., Tseng, M. L., Chiu, A. S., and Ali, M. H., (2020). Profit maximization for waste furniture recycled in taiwan using cradle-to-cradle production programming, *Mathematical Problems in Engineering*, 2020(1), 2948049. DOI: [10.1155/2020/2948049](https://doi.org/10.1155/2020/2948049)
- Lee, S., and Buck, L., (2020). *Sustainable design approaches using waste furniture materials for design students*. The Design Society, Doctoral thesis, Buckinghamshire New University. DOI: [10.35199/EPDE.2020.38](https://doi.org/10.35199/EPDE.2020.38)
- Lubonja, O., and Ovidiu, F., (2019). Use of recyclable materials in the interior design, *European Journal of Economics and Business Studies*, 5(2), 79-100, DOI: [10.26417/ejes.v5i2.p79-100](https://doi.org/10.26417/ejes.v5i2.p79-100)
- Marsahala, P., Nediari, A., and Roesli, C., (2023). Exploring Indonesia's recycled-plastic waste material in interior design for sustainable interior eco-planning, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1169, (1), 012049, IOP Publishing. DOI: [10.1088/1755-1315/1169/1/012049](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1169/1/012049)

- Máté, K., (2007). Using materials for sustainability in interior architecture and design, *Journal of Green Building*, 2(4), 23-38, DOI: [10.3992/jgb.2.4.23](https://doi.org/10.3992/jgb.2.4.23)
- Md Razali, A. S., (2016). Furniture design: Coffee table using recycle materials (solid wood waste), FurnitureTechnology Faculty of Applied Sciences, Universiti Teknologi MARA <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/22717/>
- Muhammad Suandi, M. E., Amlus, M. H., Hemdi, A. R., Abd Rahim, S. Z., Ghazali, M. F., and Rahim, N. L., (2022). A review on sustainability characteristics development for wooden furniture design, *Sustainability*, 14(14), 8748, DOI: [10.3390/su14148748](https://doi.org/10.3390/su14148748)
- Munteanu, A. (2021). Eco-design. Furniture made of recycling materials-a new concept for the contemporan design, *Journal of Social Sciences*, 4(3), 60-70, DOI: [10.52326/jss.utm.2021.4\(3\).07](https://doi.org/10.52326/jss.utm.2021.4(3).07)
- Mrinalini, A., Sasidhar, K., and Jayanthi, D., (2023). Study on the application of reuse and recyclable materials in designing the regional commercial interior spaces. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1210 (1), 012019, IOP Publishing. DOI: [10.1088/1755-1315/1210/1/012019](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1210/1/012019)
- Ofori-Agyei, G. O., Baah, O. P. K., Adom, D., Amankwa, J. O., and Abedi, A., (2023). Upcycling of solid waste for furniture production: an environmentally sustainable solution for waste disposal, *Journal of Innovations and Sustainability*, 7(4), 04-04, DOI: [10.51599/is.2023.07.04.04](https://doi.org/10.51599/is.2023.07.04.04)
- Ouyang, C., and Wu, K. Y., (2015). A DFA-Based Wood Frame furniture design using quality function deployment: a case study in school open spaces. In *International Conference on Chemical, Material and Food Engineering*, pp. 517-520. Atlantis Press. DOI: [10.2991/cmfe-15.2015.121](https://doi.org/10.2991/cmfe-15.2015.121)
- Pralat, B., Owsian, A., and Rogozinski, T., (2024). Reducing, reusing, and recycling in the furniture industry: A mini-review, *Global Forest Journal*, 2(02), 161-168, DOI: [10.32734/gfj.v2i02.16731](https://doi.org/10.32734/gfj.v2i02.16731)
- Pringle, A. M., Rudnicki, M., and Pearce, J. M., (2018). Wood furniture waste-based recycled 3-D printing filament, *Forest Products Journal*, 68(1), 86-95. DOI: [10.13073/FPJ-D-17-00042](https://doi.org/10.13073/FPJ-D-17-00042)
- PRISMA (2020). PRISMA flow diagram. <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-flow-diagram>
- Ramadan, M. E. (2023). Benefiting from recycled waste in furniture manufacturing to realize environmental sustainability, *International Design Journal*, 13(6), 21-31, DOI: [10.21608/idx.2023.317931](https://doi.org/10.21608/idx.2023.317931)
- Ridwan, A. A. D., Setiawan, F., Saragih, H. D. G., Aminulloh, M. N., and Satiadhi, P. P. G., (2021). Factors affecting consumers' intention to purchase environmentally friendly products: recycle furnitures, *JRB-Jurnal Riset Bisnis*, 5(1), 99-109, DOI: [10.35814/jrb.v5i1.2736](https://doi.org/10.35814/jrb.v5i1.2736)
- Sari, D. P., Afifah Mahdiyah, A. S. A., and Purwaningsih, R., (2025). Assessing environmental impact and eco-efficiency of wood waste gallon holders using life cycle assessment, *Journal of Ecological Engineering*, 26(3), DOI: [10.12911/22998993/199727](https://doi.org/10.12911/22998993/199727)
- Sofiana, Y., and Fajarwati, A. A. (2018). Environmentally friendly material characteristics applied to interior and furniture, In *3rd International Conference on Creative Media*,

- Design and Technology (REKA 2018)* (pp. 235-237). Atlantis Press. DOI: [10.2991/reka-18.2018.53](https://doi.org/10.2991/reka-18.2018.53)
- Susanty, A., Sari, D. P., Budiawan, W., and Kurniawan, H., (2016). Improving green supply chain management in furniture industry through internet based geographical information system for connecting the producer of wood waste with buyer, *Procedia Computer Science*, 83, 734-741, DOI: [10.1016/j.procs.2016.04.161](https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.161)
- Sydor, M., Kwapich, A., Lira, J., and Langová, N., (2022). Bibliometric study of the cooperation in the engineering and scientific publications related to furniture design, *Drewno, Prace Naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 65(209), DOI: [10.12841/wood.1644-3985.389.05](https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.389.05)
- Trela, W. N., (2017). *Ecological Materials for Interior Design Use: Impact of Wood and Recycling Materials, for People Lives and the Environment* (Master's thesis, Universidade de Lisboa (Portugal)). <https://repositorio.ulisboa.pt/handle/10451/35128>
- VOSviewer (2025). Visualizing Scientific Landscapes. <https://www.vosviewer.com/>
- Xue, G., and Chen, J., (2024). Strategies for applying shape grammar to wooden furniture design: Taking traditional Chinese Ming-style recessed-leg table as an example, *BioResources*, 19(1), 1707, DOI: [10.15376/biores.19.1.1707-1727](https://doi.org/10.15376/biores.19.1.1707-1727)
- Wang, Y., Liu, C., Zhang, X., and Zeng, S., (2023). Research on sustainable furniture design based on waste textiles recycling, *Sustainability*, 15(4), 3601, DOI: [10.3390/su15043601](https://doi.org/10.3390/su15043601)
- Wastepresso (2025). <https://www.wastepresso.com/>
- Yang, D., and Zhu, J., (2021). Recycling and value-added design of discarded wooden furniture, *BioResources*, 16(4), DOI: [10.15376/biores.16.4.6954-6964](https://doi.org/10.15376/biores.16.4.6954-6964)
- Yousef, D. M. K., and Alqandi, H. A., (2018). Recycled products in the realm of furniture and interior design in Kuwait. *International Design Journal*, 8(3), 289-297, DOI: [10.21608/idx.2018.85514](https://doi.org/10.21608/idx.2018.85514)
- Zhang, Z., Zhu, J., and Qi, Q., (2023). Research on the recyclable design of wooden furniture based on the recyclability evaluation, *Sustainability*, 15(24), 16758, DOI: [10.3390/su152416758](https://doi.org/10.3390/su152416758)
- Zhang, H. Y. (2011). Rational consideration on package design of wooden furniture, *Advanced Materials Research*, 211, 250-253, DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.211-212.250](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.211-212.250)
- Zheng, W., Zhong, S., and Xiong, X. (2025). Measures and suggestions for recycling and reuse of waste wooden furniture, *Wood Material Science and Engineering*, 1-9, DOI: [10.1080/17480272.2025.2514218](https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2514218)
- Zhu, L., Yan, Y., and Lv, J. (2023). A bibliometric analysis of current knowledge structure and research progress related to sustainable furniture design systems. *Sustainability*, 15(11), 8622, DOI: [10.3390/su15118622](https://doi.org/10.3390/su15118622)



Ahşap ve çelik malzemenin bükme mobilyada kullanımı: literatür incelemesi

Feyza Mendi¹, Ayşe Seda Çalışkan^{2*}, Onur Ülker³

ÖZ: Bu çalışma, ahşap ve çelik malzemenin iç mekânda bükme mobilya tekniğiyle kullanımını tarihsel, yapısal ve tasarım boyutlarıyla inceleyerek konuyu bütüncül bir çerçevede ele almayı amaçlamaktadır. Mobilya tarihinde bükme tekniğinin önemine vurgu yapan çalışmada, 19. yüzyılda Michael Thonet'in tasarımları ile başladığı kabul edilen bükme ahşap mobilya ve 20. yüzyılda modernizmin etkisiyle Marcel Breuer'in tasarımları ile başlayan çelik boru mobilyanın gelişim çizgisi ortaya konmaktadır. Ahşap ve çelik bükme mobilyaların tasarım potansiyelleri, üretim teknikleri ve iç mekânlara katkıları, literatürde yer alan kaynaklar doğrultusunda değerlendirilmiştir. Çalışmada derleme yöntemi benimsenmiş; bu kapsamda konuya ilişkin akademik yayınlar, bükme mobilya tarihine yönelik kaynaklar ve teknik belgeler sistematik şekilde taranmıştır. Bulgular, bükme tekniğiyle şekillendirilen ahşap ve çelik malzemenin biçimsel ve teknik açıdan çeşitli olanaklar sağladığını, bu olanakların mobilya tasarımında hafiflik, dayanıklılık, hızlı üretim ve estetik bakımından önemli değişiklikler yarattığını göstermektedir. Çalışma, Thonet ve Breuer'in öncülüğünde gelişen bükme mobilyanın tarihini ve üretim tekniklerini literatürdeki bilgiler ışığında bir araya getirerek, bu alana yönelik bütüncül bir bakış açısı sunması bakımından önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bükme ahşap mobilya, Çelik boru mobilya, Thonet, Breuer

Use of wood and steel materials in bending furniture: literature review

ABSTRACT: This study explores the use of wood and steel in bent furniture techniques from historical, structural, and design standpoints, offering a comprehensive framework. It highlights the historical significance of bending techniques in furniture design, tracing the evolution of bentwood furniture, initiated by Michael Thonet in the 19th century, and tubular steel furniture, pioneered by Marcel Breuer in the 20th century. This study evaluates the production methods and contributions of bentwood and tubular steel furniture to interior spaces, based on a thorough review of academic literature, historical sources, and technical documentation. Using a compilation method, the study systematically investigates how bending techniques have impacted furniture design. The findings suggest that wood and steel, when shaped through bending, offer unique opportunities for innovation in form, technique, and functionality. These innovations have led to major advancements in terms of lightness, durability, speed of production, and aesthetic appeal. By bringing together the development and production processes of bentwood and bent steel furniture, this study contributes a well-rounded perspective to the field, emphasizing the enduring relevance of Thonet's and Breuer's contributions.

Keywords: Bentwood furniture, Tubular steel furniture, Thonet, Breuer

Makale tarihçesi: Gelis: 31.07.2025, Düzeltme: 02.10.2025, Kabul: 04.10.2025, Yayınlanma: 16.12.2025 *ascaliskan@ktun.edu.tr

¹Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü, Bolu/Türkiye,

²Konya Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü, Konya/Türkiye,

³Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü, Eskişehir/Türkiye,

Atıf: Mendi, F., Çalışkan, A.S., ve Ülker, O., (2025), Ahşap ve çelik malzemenin bükme mobilyada kullanımı: literatür incelemesi, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 8 (2), 471-486, DOI: [10.33725/mamad.1754965](https://doi.org/10.33725/mamad.1754965)

1 Giriş

Mekânın önemli bileşenlerinden biri olan mobilya, yıllar içinde gelişen üretim teknikleri ve malzeme teknolojileri sayesinde dönüşüm geçirmiş ve her döneme özgü tasarım yaklaşımlarının şekillenmesinde belirleyici bir unsur olmuştur. Bu bağlamda, malzeme özelliklerinin ve üretim süreçlerinin anlaşılması, mobilya tasarımcıları açısından temel bir gereklilik hâline gelmiştir (Kang, 2010). 19. yüzyılın ortalarında Michael Thonet tarafından geliştirilen buharlı ahşap bükme tekniği, mobilya tasarımında devrim niteliğinde bir yenilik olarak değerlendirilmiştir. Bükme ahşap mobilya üretim yöntemi temelde, ahşabın ısı ve nem yardımıyla şekillendirilmesine dayalı bir üretim yöntemidir (Han, 2004). Bu teknik hem estetik hem de işlevsel mobilya tasarımlarının ortaya çıkmasına olanak sağlayarak mobilya tarihinde kalıcı bir yer edinmiştir.

Bükme ahşap mobilya, modern mobilya tasarımının erken örneklerinden biri olarak kabul edilmiş ve sanayileşme sürecinin hız kazanmasıyla birlikte seri üretime uygun hâle gelmiştir. 20. yüzyılın başlarında ise Michael Thonet'in üretim mantığından ilham alan Marcel Breuer, bu kez çelik boru malzeme ile mobilya tasarımına yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Modern iç mekânlara ve dönemin seri üretim anlayışına son derece uygun olan çelik boru mobilya tasarımları, dönemin tasarım dünyasında bir kırılma noktası olarak değerlendirilmiştir. Breuer'in boru şeklindeki çelikten ürettiği mobilyalar hem estetik anlamda hem de üretim anlamında özgünlük taşımakla birlikte modern yaşamın gerekliliklerine karşı geliştirilen çözümler olarak yorumlanmıştır (Wilk, 1981). Breuer, dar bir yelpazedeki malzeme ve mobilya türlerini büyük bir duyarlılıkla kullanarak, iç mekânlardaki tasarım problemlerine nitelikli ve yenilikçi çözümler getirmiştir.

Bükme tekniğiyle üretilen ahşap ve çelik mobilyalar, mobilya tasarımında yalnızca biçimsel bir yenilik olarak değerlendirilmemelidir. Aynı zamanda üretilebilirlik, dayanıklılık, hafiflik ve mekânsal ilişkiler açısından önemli bir dönüşüm sürecini temsil etmektedir (Kang, 2010). Dolayısıyla, mekânın temel yapıtaşlarından biri olan mobilyanın, tasarımına dair tekniklerin ve bu tekniklerin tetiklediği düşünsel yeniliklerin anlaşılması hem mobilya tasarımı hem de içmimarlık disiplini için önem arz etmektedir. Bükme mobilya teknikleri ile ilgili, özellikle Michael Thonet ve Marcel Breuer'in çalışmaları başta olmak üzere, literatürde çeşitli araştırmalar bulunmaktadır (Kertemelidou, 2018; Cacciola, 2022). Bu kapsamda, tarihi ve teknik yaklaşımların yanı sıra, mobilyaların iç mekândaki kullanım biçimleri, kullanıcı deneyimi üzerindeki etkileri ve mekânsal algı bağlamındaki yansımaları da araştırmalara konu olmuştur. Bu çalışma, söz konusu teknikler üzerine yapılmış çalışmaları derleyerek, mobilya ve malzeme teknolojilerine ilişkin daha bütüncül bir bakış açısı geliştirmeyi hedeflemektedir. Böylece bükme mobilya tekniklerinin tarihçesi ile günümüzdeki uygulama alanları daha anlaşılır hale gelmekte ve malzeme-form-mekân ilişkisi çok katmanlı bir perspektifle ele alınmaktadır.

Bu çalışma, bükme tekniğiyle üretilen ahşap ve çelik mobilyaların tarihi gelişimine ve dönemin tasarım anlayışlarına dair kuramsal bir derleme niteliğindedir. Literatürdeki ilgili kaynakların taranması yoluyla oluşturulan bu çalışmada, Thonet'in geliştirdiği buharlı ahşap bükme tekniği ve Breuer'in uyguladığı çelik boru bükme yöntemi kendi dönemsel ve düşünsel bağlamları içinde ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Her iki tasarım yaklaşımında kullanılan malzemeler, benimsenen biçimsel yaklaşımlar ve üretim yöntemleri incelenmiş; bu mobilya türlerinin iç mekân tasarımıyla kurduğu ilişkiler çözümlenmiştir. Bu çalışmanın amacı, çelik ve ahşap malzemenin bükme tekniğiyle mobilya tasarımında kullanımını tarihi, estetik ve işlevsel boyutlarıyla incelemek; Michael Thonet ve Marcel Breuer'in geliştirdiği

mobilya örnekleri üzerinden bu tekniklerin iç mekân tasarımıyla kurduğu ilişkiyi kendi bağlamları içerisinde ortaya koymaktır.

2 Metot

Bu çalışma, mobilya üretiminde ahşap ve çelik üzerinde uygulanan bükme tekniğinin tarihsel gelişimini, tasarıma, estetiğe ve işleve olan etkilerini ele alan kuramsal bir derleme çalışmasıdır. Derleme yöntemi kuramsal temellere dayalı, belirli bir konuda mevcut literatürün sistematik biçimde taranarak yapılandırılmasına dayanmaktadır. Araştırma kapsamında buharlı ahşap bükme tekniğinin öncüsü Michael Thonet'in ve çelik boru mobilyanın öncüsü Marcel Breuer'in teknikleri ve tasarımları incelenmiş; bu tekniklerin tasarım tarihindeki konumu ve gelişimi, üretim yaklaşımlarının dönüşümü ve bükme mobilyanın iç mekânla ilişkisi mevcut literatür ışığında değerlendirilmiştir.

2.1 Veri toplama ve analiz

Bu çalışmanın veri seti, Thonet ve Breuer'in bükme mobilya tasarımlarına ve üretim tekniklerinin gelişimine odaklanan uluslararası hakemli dergilerde ve bilimsel toplantılarda yayımlanmış nitel araştırmaları, tarihsel incelemeleri ve kavramsal makaleleri kapsamaktadır. Derleme kapsamında kullanılan makaleler, Google Scholar, JSTOR, Taylor & Francis, Oxford Academic, ResearchGate, DergiPark ve TR Dizin gibi açık erişimli çeşitli veri tabanlarında yürütülen taramalar aracılığıyla seçilmiştir. Literatür taraması gerçekleştirilirken aratılan anahtar kelimeler hem İngilizce hem de Türkçe olarak belirlenmiştir. Tarama kapsamında "Bentwood Furniture", "Bükme Ahşap Mobilya", "Michael Thonet", "Thonet Chairs", "Tubular Steel Furniture", "Marcel Breuer", "Çelik Boru Mobilya", "Wassily Chair", "Cesca Chair" gibi terimler aratılmıştır. Belirlenen anahtar kelimelerle yapılan taramalar sonucunda gerçekleştirilen araştırma seçkilerinde yayın dili, yayıncı, konu ve anlam bütünlüğü, akademik açıdan yeterlilik gibi ölçütler göz önünde bulundurulmuş ve konuyla doğrudan ilişkili çalışmalar değerlendirilmiştir. Alanda bulunan araştırmaların bu çalışmaya dahil edilme ölçütleri ise şu şekildedir:

- Thonet veya Breuer'in mobilya tasarım anlayışıyla ilgili olması,
- Konuyu teknik ve tarihsel açıdan ele alması,
- Bükme mobilya tekniğini irdelemesi,
- İç mekânla bükme mobilya ilişkisine dair çözümlemeler içermesi
- Hakemli dergi ya da akademik kaynaklarda yayımlanması

Bu kapsamda yapılan araştırmalar sonucunda belirlenen 17 akademik makalenin yanında konunun tarihsel ve güncel tarafına katkı yapması açısından kitap bölümleri ve sempozyum bildirileri gibi ek kaynaklardan da yararlanılmıştır. Detaylı bir şekilde incelenen bu çalışmalarda yazarların konuyu ele alma biçimi, aktarım yöntemleri ve analiz çerçevesi dikkatle değerlendirilmiştir. Bu çalışmalardan yapılan çıkarımlar doğrultusunda içerikler tematik başlıklar altında gruplandırılmış, sistematik bir analiz süreci gerçekleştirilmiştir. Özellikle bükme mobilyanın üretim teknikleri, malzeme kullanımı, tasarım ilkeleri ve üretimlerin iç mekâna entegrasyonu ve etkisi çözümlenmiştir.

Tanımlanan bu yöntem doğrultusunda gerçekleştirilen kuramsal derleme çalışması, tarihsel verileri ortaya koyarken aynı zamanda kavramsal bir çerçeve de üretmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, Thonet ve Breuer gibi bükme mobilyaya öncülük eden isimlerin ortaya koyduğu tasarımlar aracılığıyla bükme mobilya tekniklerinin iç mekân bağlamında değerlendirilmesine alan açmaktadır.

3 Bulgular ve Tartışma

3.1. Üretim yöntemleri

Bir hammadde olarak ahşap, yeryüzündeki varlığından bu yana insanın hayatta kalmasına ve medeniyetlerin gelişmesine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Ahşap malzeme sertliği, esnekliği, mukavemeti ve yoğunluğu sayesinde pek çok alanda kullanılmaktadır. Ahşap, sürekli bir yüke dayanabilen ve nesiller boyu varlığını sürdürebilen uzun ömürlü doğal bir malzemedir. Ayrıca çok yönlülüğü ve bulunabilirliği nedeniyle mimari ve inşaat sektöründe en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Benzersiz lifli yapısı sayesinde ahşap doğal olarak bükülebilir ve kavisli ve esnek elemanlar oluşturulabilir (Kırkpınar ve ark., 2025). Meşe ve ceviz gibi ağaçlardan elde edilen ahşap malzeme daha sert bir yapıya sahipken; çam, kayın ve ladin gibi ağaçlardan elde edilen ahşap malzeme daha yumuşaktır. Buna rağmen her ikisinden de oldukça dayanıklı mobilyalar üretilebilmektedir. Ahşap uzun ömürlü bir malzeme olmakla birlikte, ahşap mobilyalar son derece esnektir ve çok az bakım gerektirmektedir. Bu sayede ahşap mobilyalar bakımları yapılarak tekrar kullanılabilirler. Ahşap mobilyaların bakımları zımparalama, boyama, vernikleme, cilalama ve kaplama gibi yöntemlerle yapılmaktadır. Açık veya koyu renkli alternatifleri ile ahşap malzeme iç mekânlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Namichev ve Petrovski, 2019).

Sandalye, kullanıcısı olan insanın oturma, dinlenme, çalışma gibi işlevlerine hizmet eden ve herkes tarafından sık kullanılan endüstriyel bir üründür. Aynı zamanda tarihte çok farklı biçimlerde tasarlanmış ve kullanılmış estetik bir nesnedir. Temel bir insan ihtiyacını karşılayanın yanı sıra yeni malzemelerin ve üretim tekniklerinin gelişimini de göstermekte, teknik yenilikleri bünyesinde barındırmaktadır (Kertemelidou, 2018). Ayrıca hem iç mekânların hem de mobilya tasarımlarının tarihi sürecine ve farklı dönemlerde gelişen beğeni algısına ışık tutmaktadır.

Mobilya üretiminde oldukça önemli bir yere sahip olan ahşabın temin edilmesi, işlenmesi ve nakliyesindeki çeşitli zorluklar sebebiyle, malzemeyi işlemek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerden biri ahşabın bükülmesi yoluyla işlenmesi tekniğidir. Ahşabı istenilen biçimde kıvrımayı mümkün kılan ahşap bükme tekniği, müzik aletleri, gemiler ve tekerlekler gibi araçların yapımında kullanılmıştır. Ahşap bükme işlemi, kullanım amacına ve istenen biçime bağlı olarak ahşap malzemeye yapay bir bükme kuvveti uygulanarak yapılmaktadır. Ahşap malzemenin bükülmesinde “buharlı bükme, amonyakla bükme, yüksek frekanslı bükme, kerf yöntemi ile bükme ve laminasyon yöntemi ile bükme” olmak üzere 5 farklı teknik kullanılmaktadır (Kang, 2010).

19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyıl, mobilya alanında da diğer pek çok alanda olduğu gibi köklü bir dönüşüm dönemine işaret etmektedir. Endüstrileşmeyle birlikte gelişen teknik imkânlar, el işçiliğine dayalı üretimden seri üretime geçişi beraberinde getirmiştir (Mutdoğan ve Elibol, 2023). Zaman içerisinde ahşabın modern gereksinimleri karşılamada yetersiz kaldığı düşüncesi ağırlık kazanmıştır. Özellikle 1920’li yıllarda, modern mobilya tasarımında ahşaptan çeliğe geçişin yalnızca estetik bir tercih olmadığı; bunun ötesinde işlevsellik, dayanıklılık, hijyen, seri üretim potansiyeli ve modern yaşam biçiminin gereksinimlerine cevap verme gibi pratik ve ekonomik gerekçelere dayandığı anlaşılmıştır (Hassenpflug ve ark., 1990). Bu bağlamda, modern mobilya tasarımında çelik boru (tubular steel) kullanımı hem malzeme özellikleri hem de üretim kolaylığı açısından devrim niteliğinde bir yenilik olarak değerlendirilmiştir. Geleneksel ahşap mobilya üretiminde olduğu gibi yoğun el işçiliği gerektirmeyen bu malzeme, seri üretime daha elverişli yapısıyla dönemin üretim ihtiyaçlarına yanıt vermiştir (Johnson, 1981). Tüm bu avantajları göz önünde bulundurulduğunda çelik,

ahşabın sınırlılıklarına karşı daha üstün bir alternatif olarak görülmüş ve bu geçiş, tasarım tarihinde bir devrim olarak nitelendirilmiştir (Hassenpflug ve ark., 1990).

Esnek ve kavisli yüzeylerin üretimi, mimaride öne çıkan bir araştırma alanı haline gelmiştir. Birçok çalışma, eğrisel geometriler ve serbest formlu yüzeyler elde etmek için malzemeler ve üretim tekniklerine odaklanmaktadır (Kırkpınar ve ark., 2025). Çelik boru mobilya üretimi dört temel aşamada gerçekleşir; borunun bükülmesi, parçaların birleştirilmesi, yüzey kaplama işlemleri ve döşemenin sabitlenmesi. Bükme işlemindeyse iki temel yöntem kullanılır; ilki, borunun düşük erime noktasına sahip bir dolgu maddesi (örneğin reçine) ile doldurulup kalıp etrafında şekillendirilmesi, ikincisi ise borunun, bükme noktasında konumlandırılan sabit bir çelik mandrel yardımıyla bükülmesidir. Her iki yöntemde borunun iç yüzeyinde çökme, dış yüzeyinde ise gerilme kaynaklı deformasyon riski bulunur. Birleştirme aşamasında çoğunlukla oksii-asetilen kaynağı tercih edilse de flaş ve direnç kaynakları daha hızlı ve ekonomiktir. Özellikle alın ve dik açılı eklemlerinde bu yöntemler etkin biçimde kullanılmaktadır. Son aşamada kaynaklı yüzeyler temizlenip zımparalanarak kaplamaya hazır hale getirilir. Yüzey işlemleri arasında en yaygın olanlar elektrokaplama (örneğin krom), selüloz püskürtme ve emayelemedir (Giedion ve ark., 1990).

Çelik borunun mobilya üretiminde kullanımı ilk olarak 1830’larda İngiltere’de yataklarda, 1844’te ise Fransa’da oturma odası mobilyalarında görülse de bu malzemenin yükselişi ve tasarıma entegre edilmesi modernizmin etkisiyle mümkün olmuştur. Hafiflik, hijyen, endüstriyel üretime uygunluk ve mekanik estetik gibi nitelikleriyle çelik boru, modern iç mekân anlayışının gereksinimlerini karşılamış ve dönemin ikonik mobilyalarının temel malzemesi haline gelmiştir (Giedion ve ark., 1990; Ezenci ve Özkaraman Şen, 2018). 1927’de Weissenhof Siedlung sergisinde sergilenen Mart Stam’ın konsol sandalyeleri, bu alandaki ilk örnekler arasında yer alsa da esas atılım Marcel Breuer ile gerçekleşmiştir. Breuer, bisiklet iskeletinden ilhamla geliştirdiği tasarımlarında çelik boruyu işlevsel, hafif ve seri üretime uygun bir yapısal eleman olarak kullanmış; Bauhaus’un modern form arayışını Thonet’in ahşap bükme mirasıyla harmanlamıştır (Giedion ve ark., 1990; Bergdoll, 2018). Bu mobilyalar yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda modernist düşüncenin, teknolojinin ve sanayi üretiminin estetik yansıması olarak değerlendirilmektedir (Johnson, 1981) (Şekil 1).



Şekil 1. Ahşap bükme ve çelik boru mobilya üretim süreçlerinden kesitler (Thonet, 2025)

3.2 Michael Thonet ve ahşap bükme mobilya

Thonet mobilyalarının tarihi, 1819 yılında ilk atölyesini Almanya’nın Boppard kentinde açan marangoz ve doğramacı Michael Thonet’in çalışmaları ile başlamıştır. Ardından Viyana’ya yerleşen Thonet, 1849 yılında Viyana’da bir aile şirketi kurmuştur. Thonet sandalyeleri, şirketin ilk işlerinden biri olan Cafe Daum’un iç mekânında No.4 sandalyelerin kullanılmasının ardından No.14 sandalyesi ile uluslararası anlamda tanınır hale gelmiştir.

1859 yılında tasarlanan ve Viyana Kahve Evi Sandalyesi olarak da adlandırılan 14 numaralı sandalye, masif kayın ağacının bükülmesi tekniği ilk kez kullanılarak, bir sandalyenin endüstriyel olarak üretilmesini sağlamıştır. Küreselleşmeden çok önce, neredeyse dünya çapında bulunabilen bir ürün tasarlanmış ve üretilmiştir. Tasarımı modüler bir prensibe dayandırılmış, bileşenler parçalarına ayrılarak üretilmiş ve birleştirilmiştir. Bu yöntem, talebe yönelik ve ekonomik olmanın yanı sıra oldukça verimli bir üretim yaratmıştır (Thonet, 2025).

1851'de Hyde Park'ta Crystal Palace'ta düzenlenen Londra Büyük Sergisi'nde (Great Exhibition) bükme ahşap mobilyaların tanıtılmasının ardından, Michael Thonet, bükme mobilya üretimi için buhar işleme sürecinin geliştirilmesinde öncü olarak kabul edilmiştir. Ardından Thonet, bir mobilya üretim fabrikası kurmuş ve döneminin şartları için yenilikçi olan bükme ahşap mobilyaları seri üretim yöntemiyle üretmeye başlamıştır (Kang, 2010).

1830'larda zamanın standartlarıyla karşılaştırıldığında daha az bileşenle daha hafif mobilyalar üretmek için denemelere başlayan Michael Thonet, aynı yapım ilkelerini ve standartlaştırdığı unsurları kullanarak, güçlü bir biçimsel benzerliğe sahip farklı sandalye tasarımları üretmiş ve böylece kendi tasarım dilini yaratmıştır. Tasarladığı sandalyelerin kolayca monte edilebilir oluşu, minimum eleman sayısı, endüstriyel verimlilik ve aynı nesnenin farklı versiyonlarını bir araya getirmek için kullanılabilecek değiştirilebilir elemanlardan oluşan bir sistem olarak mobilya tasarımına modüler yaklaşımı, Michael Thonet'i seri üretimin öncüsü yapmıştır (Noblet, 1993; Barros ve ark., 2011). Thonet tarafından tasarlanan mobilyalar, on sekizinci yüzyılda George Hepplewhite ve Thomas Sheraton tarafından tasarlanan mobilyalara benzer bir biçimsel bütünlük sunmakla birlikte, sadeleştirmeye giderek işlevselliğe daha güçlü bir vurgu yapmıştır (Oates, 1981; Barros ve ark., 2011).

Thonet sandalyelerin yapısal unsurları; sırtlık ve arka ayak çerçevesi, sırtlık iç alanı, ön ayaklar, bağlantı ayağı ve oturma alanıdır. Thonet sandalye stili, hafif ve zarif yapısı ile karakterize edilmektedir. Sırtlık ve arka ayaklar, organik bir şekle sahip tek bir buharda pişirilmiş kayın ağacı profilinden yapılmıştır. Bu eleman, oturma yerinde daha dar olan hassas bir kavisle alttan yükselmektedir. Bu eğri hem önden hem de yandan gözlemlenebilmektedir. Oturma yeri ahşap veya rattan kaplı bir halkadır. Bazı versiyonlarda dört ayağa bağlı, daha alçakta konumlandırılmış ikinci bir halka bulunmaktadır. Bununla birlikte, modeller arasındaki ayırt edici özellik sırtlık tasarımıdır. Sırtlık bölümü eğrisel veya "S" benzeri şekillerde bükülmüş bir veya iki kayın profilinin kullanılmasıyla oluşturulmaktadır. Bu elemanlar sırtlık çerçevesine, oturma yüzeyine veya birbirlerine bağlanabilmektedir. Thonet sandalyeleri işlevseldir ve işlevi dışında herhangi bir süsleme içermemektedir (Şekil 3) (Barros ve ark., 2011).



Şekil 3. Thonet tarafından tasarlanan No.4, No.14, No.18 ve No.15 sandalyeleri (URL 1, 2019.; URL 2, 2024; URL 3, 2012)

Bu yeniliklerin yanında No.14 sandalyesi mobilyanın monte edilmeye hazır halde parçalarına ayrılmış ve paketlenmiş halinin bilinen ilk örneğidir. No.14 sandalyesi 1 m³ hacme 36 adet sandalye yerleştirilerek taşınmıştır. 6 ahşap parçadan oluşan ve 10 adet vida sayesinde kolaylıkla monte edilebilen sandalye, tutkal yardımıyla birleştirilmemesi sayesinde demonte olarak ambalajlanabilmiştir. Bir bakıma Thonet, endüstriyel seri üretim şeklini keşfetmiş ve sandalyeyi parçalarına ayırarak ambalajlayıp satma fikrini ortaya koymuştur. Günümüzde de üretim ve satışı devam eden Thonet sandalyeleri, montajı kullanıcı tarafından yapılan mobilyalara bir alt yapı oluşturmuş ve esin kaynağı olmuştur (Şekil 4) (Kayacan ve ark, 2016).



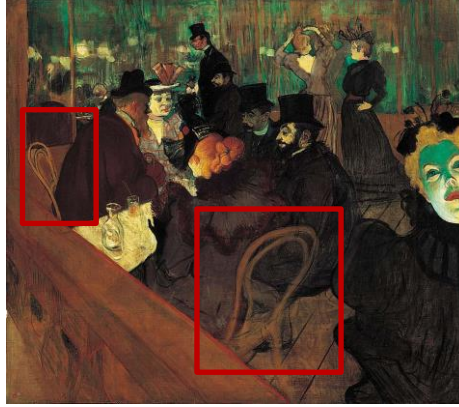
Şekil 4. 1 m³ hacimde demonte halde taşınan 36 adet Thonet No.14 sandalyesi (Thonet, 2025)

1890'lı yıllara gelindiğinde Thonet'in bükme ahşap sandalyeleri Viyana'daki restoran ve kafelerde kullanılmaya başlanmıştır. O dönemde pek çok sanatçı, yazar, edebiyatçı, politikacı ve pek çok ünlü ismin uğrak noktası olan Cafe Griensteidl'de No.4 sandalyeleri kullanılmıştır (Şekil 5). Thonet'in ahşabın bükülmesi tekniğiyle üretilen sandalyeleri orijinal bir stili ve kültürü temsil etmektedir. Hem tarihi klasikler hem de zamansız tasarımlar olmakla birlikte miras bırakılan tanınmış kültürel varlıklar olarak değerlendirilmektedir. Tasarlandıkları günden bu yana insanların bir araya geldiği, etkileşim kurduğu, dinlendiği veya çalıştığı mekânlarda, konutlarda, bekleme alanlarında ve ofislerde kullanılmışlardır. (Thonet, 2025).



Şekil 5. Cafe Griensteidl'de kullanılan No.4 sandalyeleri (URL 4, 2022)

Thonet sandalyeleri farklı sanatçılar tarafından resmedilmiştir. Henri Toulouse-Lautrec, 1892 tarihli "at the Moulin Rouge" adlı tablosunda, Henri Matisse, 1918 yılında çizdiği "Interior with a Violin Case" adlı eserinde Thonet sandalyelerini resmetmiştir (Şekil 6) (Thonet, 2025).



Şekil 6. Henri Toulouse-Lautrec'in "at the Moulin Rouge" adlı eserinde Thonet sandalyeleri (URL 5, 2021)

Thonet mobilyalarını aktif olarak kullanan ve modern mobilyanın öncüsü olarak kabul edilen Le Corbusier, No.14 sandalyesi için "Daha önce hiçbir şey bu kadar iyi yaratılmamıştı" ifadesini kullanmıştır. No.14 sandalyesi uygun fiyatlı, hafif, zarif, montajı ve bakımı kolay olması sebebiyle tüm zamanların en başarılı sandalyesi olarak tanımlanmaktadır ve ilk piyasaya sürüldüğünden bu yana milyonlarca satılması ve günümüzde üretimine devam ediliyor olması nedeniyle "sandalyelerin sandalyesi" tamlamasıyla anılmaktadır (Kertemelidou, 2018; 5,6,7).

"Die Form" dergisinde mimar Ferdiand Kramer, 1929 yılının başında Thonet fabrikalarında günlük ortalama üretimin 18.000 sandalyeye ulaştığını ifade etmiştir. Tüm bunlarla birlikte Thonet, o dönemde mimarlar ve mobilya tasarımcıları için oldukça önemli olan bazı standartların geliştirilmesi konusunda önemli bir örneği temsil etmektedir. Josef Frank ve Adolf Schneck gibi tasarımcılar bükme ahşabı kendi mobilyalarıyla yeniden yorumlamışlardır (Thonet, 2025).

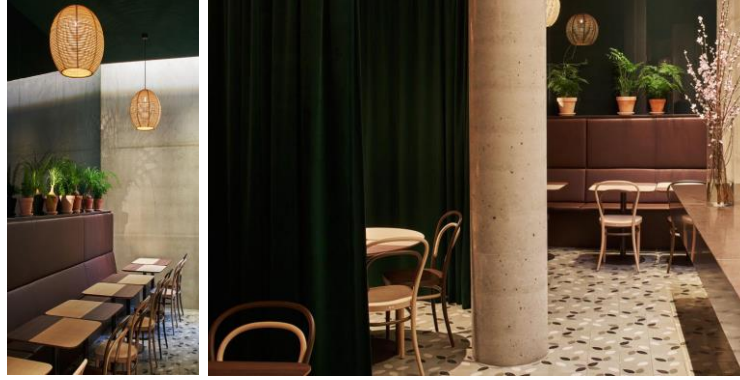
Thonet'in ardından bükme tekniğiyle üretilen çeşitli mobilyalar tasarlanmış ve oldukça tanınır hale gelmiştir. 1931 yılında Alvar Aalto tarafından tasarlanan Paimio Chair üretilmiş, bunu 1946 yılında Charles Eames ve Ray Eames tarafından tasarlanan Lounge Chair Wood (lcw) takip etmiş ve ardından 1949 yılında Hans Wegner tarafından CH24 Wishbone Chair tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Paimio Chair, Lounge Chair Wood ve CH4 Wishbone Chair (URL 6, 2024; URL 7, 2023; URL 8, 2020)

3.2.1 Ahşap bükme mobilyaların iç mekânda kullanımı

Thonet sandalyelerinin en bilinen örneği, 1859 yılında üretilen ve bağlayıcı elemanlar hariç altı yapısal elemandan oluşan 14 numaralı sandalyedir. Yalınlığı, hafifliği, düz ve kübik ambalajlarda saklanabilmesi gibi avantajları sayesinde 14 numaralı sandalye dünya çapında en çok satılan sandalyelerden biri olmuştur ve günümüzde hala üretilmekte ve çeşitli işlevlere hizmet eden iç mekânlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yönüyle başta 14 No'lu sandalye olmak üzere Thonet sandalyelerinin zamansız tasarımlar olduğu ifade edilebilir (Şekil 8). Özgün tasarımlar, zamansızlık kavramını olumlu yönde etkilemektedir. Fakat özgünlük başlı başına bir tasarımın zamansız olmasını sağlamamaktadır. Seri üretime uygun oluşu, ekonomik oluşu, uygun materyal seçimi, fonksiyonellik, rasyonellik, yalınlık ve farklı seçenekler sunma gibi özellikler zamansızlık kavramını önemli ölçüde etkilemektedir (Ezenci ve Şen, 2018; 16).



Şekil 8. Hotel Zander K, Claesson Koivisto Rune, 2017 (URL 9, 2017)

3.3. Marcel Breuer ve çelik boru mobilya

Bauhaus öğrencilerinden ve sonrasında da öğretmenlerinden olan Marcel Breuer, 20. yüzyılın en etkili tasarımcılarından ve modernist hareketin öncülerinden biri olarak kabul edilmektedir (Wilk, 1981). 1921 yılında Weimar'daki Bauhaus'a öğrenci olarak kaydolmuş ve 1925 yılında "genç usta" unvanını almıştır. Marcel Breuer'in tasarım anlayışı, Bauhaus'un öncülerinden olduğu modernizm anlayışıyla şekillenmiş, biçim ve işlev arasında güçlü bir denge ve ilişki kurma arzusuyla beslenerek gelişmiştir. Breuer, tasarımlarında süslemeyi dışlayarak, yapının kendi doğallığından gelen süssüz estetiği öne çıkarma amacında olmuştur. Ona göre iyi bir tasarım, işlevselliğini koruyarak yalın kalabilmeli, üretilebilirliği ve kullanım kolaylığı sayesinde geniş kitlelere ulaşabilmelidir (Wilk, 1981).

Breuer, Bauhaus'un Dessau'daki döneminde marangozluk atölyesinin başkanlığını üstlenmiş ve benimsediği tasarım yaklaşımı ekseninde mekânsal anlayışının yanında mobilya için yeni ve minimize edilmiş form arayışları içinde olmuştur. Bauhaus'taki eğitimi ve öğretim yılları boyunca malzeme kullanımına yönelik yenilikçi yaklaşımlarıyla tanınmış ve mobilya tasarımında önemli gelişmelere öncülük etmiştir. Geleneksel ahşap işçiliğinden uzaklaşarak modern malzeme ve üretim yöntemlerine yönelmesi, onu 20. yüzyılın en yenilikçi tasarımcılarından biri yapmıştır (Tóth, 2013). O dönemde, çelik boru ve kontrplak gibi modern malzemelere yönelmesi hem estetik hem de üretim tekniği açısından devrim niteliğindedir. Özellikle hafiflik kavramına olan bağlılığı, Breuer'in tasarım anlayışının temel taşlarından biri olmuştur (Bergdoll, 2018).

Sanayi Devrimi sonrası oluşan ihtiyaçlar doğrultusunda mobilya tasarımında işlevsellik, dayanıklılık ve seri üretim ön plana çıkmıştır (Cvetkovski ve Sidorenko, 2019). Bu süreç,

geleneksel biçimsel karmaşayı ortadan kaldırarak yalın, pratik ve ekonomik çözümler üreten bir tasarım dilini teşvik etmiştir. Mobilyada sadeleşmeye gidilmiş ve temel malzemelerin en yalın halleri kullanılmaya başlanmıştır (Ezenci ve Özkaraman Şen, 2018). Bauhaus ekolünün bir getirisi olan bu eğilimi benimseyen Breuer, işlevselliği ve malzemenin doğasını ön planda tutarak formu en sade ve etkili hâline getirmeyi hedeflemiştir. Bu anlamda mobilyalarında geleneksel üretim tekniklerinden uzaklaşarak, endüstriyel üretimin sağladığı imkânlarla malzemeyi yeniden yorumlamıştır. Bu yaklaşımı doğrultusunda da seri üretime uygun mobilya tasarımları ortaya koymuştur. Dolayısıyla Le Corbusier'in *"konut içinde yaşamak için bir makinedir"* mottosuyla paralel bir şekilde *"sandalye üzerinde oturmak için bir makinedir"* anlayışını somut bir şekilde yansıttığı ifade edilebilir (Ilekovic ve Ilekovic, 2023).

Breuer, 1925 yılında konutta kullanılmak üzere tasarladığı ilk bükülmüş boru şeklindeki çelik mobilyaları üretmiştir (Cacciola, 2022). Bu anlamda çelik boru mobilyaların mucidi olarak bilinmektedir. Modern iç mekânlara ve modern seri üretim yöntemlerine benzersiz bir şekilde uygun olan boru şeklindeki çelik mobilyalara öncülük etmesi, mobilya tasarımı alanında önemli bir gelişmeyi temsil etmektedir (Alkholy, 2024) (Şekil 9). Bauhaus'ta olduğu dönemde ilk boru çelik mobilyalarını tasarlamış ve 1926'da mobilyalarını ürettiği *"Standard Möbel"* şirketini kurmuştur (Cacciola, 2022).

Malzeme ve form arasındaki ilişkiyi yeniden tanımlayan Breuer, çelik borunun bükülebilirliği ile mobilya formunu yeni bir boyuta taşımıştır. Breuer'in bu tasarım kararı, yalnızca teknik bir tercih değil, aynı zamanda modern yaşamın hızına, işlevselliğine ve yalın estetik anlayışına verilen bir yanıttır (Johnson, 1984). Mobilyayı bir sanat nesnesinden çok işlevsel bir yapı ögesi olarak gören bu yaklaşım, dönemin diğer Bauhaus tasarımcılarıyla ortak bir zeminde buluşmuştur. Breuer'in tasarım anlayışının bir diğer yönü de kolay ve hızlı üretim üzerinden tanımladığı toplumsal düşüncedir. Breuer, bireysel kullanım için değil, endüstriyel ölçekte ve toplumun farklı kesimlerine hitap edecek ürünler geliştirmeyi hedeflemiş ve tasarımlarını bu yönde şekillendirmiştir. Bu doğrultuda mobilya tasarımları, yalnızca estetik anlamda değil, aynı zamanda ekonomik malzeme kullanımı, modülerlik ve seri üretim olanakları anlamında da değer taşımaktadır (Özkan ve Öztürk, 2023). Özellikle Standard Möbel firması aracılığıyla çelik boru mobilyalarının seri üretime geçirilmesi Breuer'in bu alandaki öncülüğünü pekiştirmiştir.

Breuer'in tasarım yaklaşımının Bauhaus felsefesiyle iç içe geçtiğini söylemek mümkündür. Mobilya tasarımına olan yaklaşımında işlev ve malzemeyi tasarımın merkezine yerleştirmiştir. Yenilikçi bakış açısıyla, kullanılan malzemenin sınırlarını zorlarken, kullanıcı konforunu ve ergonomiyi göz ardı etmemiş, aynı zamanda biçimsel sadeliği korumaya odaklanmıştır (Alkholy, 2024). Dolayısıyla onun tasarım felsefesi ve mobilyaya olan yaklaşımı modernizmin estetik ve üretime dayalı taleplerini karşılamıştır. Breuer, işlev açısından başarılı olduğu kadar, görsel anlamda güçlü örnekler ortaya koyan öncü bir tasarımcı olarak var olmuştur. Biçim, malzeme ve yenilik ekseninde geliştirdiği düşünsel altyapı, yalnızca modern mobilya tarihinde değil, çağdaş tasarım anlayışında da güçlü bir iz bırakmıştır (Ilekovic ve Ilekovic, 2023).

Marcel Breuer'in çelik boru mobilyaya yönelimi hem teknik hem de ideolojik olarak modernizmin dönüm noktalarından biridir. Breuer'in en ikonik tasarımı olan ve 1925 yılında tasarladığı Wassily Chair (B3 Modeli), modern mobilya tasarımında çelik borunun potansiyelini gösteren ilk örneklerden biridir (Cacciola, 2022). Wassily Chair hem formal anlamda hem de seri üretime uygunluğu anlamında mobilya tasarımı alanında öncü olarak kabul edilmektedir. Breuer, ahşap gibi geleneksel malzemelerin sınırlarını aşmayı,

modernizmin ilkelerine uyum sağlayacak tasarımlar ortaya koymayı arzulamıştır. Bu bağlamda çelik; hafiflik, şeffaflık, dayanıklılık ve seri üretime uygunluk gibi özellikleri ile sadece bir malzeme değil, aynı zamanda bir çağın ideali olmuştur (Alkholy, 2024). Bütün bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda Wassily Chair, Bauhaus'un ve bununla ilintili olarak modernizmin ideallerini ve felsefesini temsil eden bir ikon haline gelmiştir (Özkan ve Öztürk, 2023).

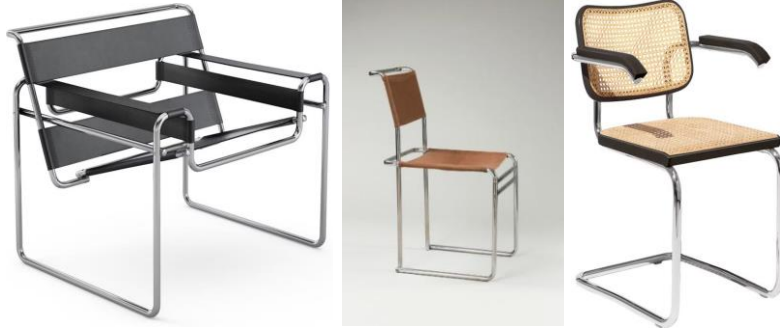
Wassily Chair'ın bükülmüş çelik borudan oluşan iskeleti, endüstriyel görünümüne rağmen insan vücuduna ve ergonomisine uyumlu formlar sunmaktadır (Şekil 10). Formunda öne çıkan şey sadece bükülmüş çelik borunun kullanımı değil aynı zamanda mekânda "boşluk" fikrinin tasarıma dahil edilmesidir. Breuer'in bu sandalyesi, kalın ve kapalı hacimler yerine açık ve akışkan bir yapı önermektedir. Bu tasarım anlayışı, geleneksel masa ve sandalye formunu dönüştürürken, kullanıcıya fiziksel ve görsel hafiflik sunmaktadır (Ertaş Beşir ve Dereci, 2021). Wassily Chair kullanıcıyı dört sabit ayak üzerine sıkıca yerleştirmek yerine oturma kısmındaki gerilmiş deri ya da kanvas sayesinde kullanıcıya bir boşlukta sallanıyor hissi vermektedir. Bunun yanında sandalye hacimsel olarak geniş bir alanı kaplamasına karşın hafif yapısı sayesinde kolaylıkla taşınabilmektedir (Bergdoll, 2018). Wassily Chair, bükülmüş ve birbirine cıvata ile bağlanmış dokuz parça çelik borudan oluşmaktadır. Orijinal döşemesinde metalik bir tuval görünümüne sahip olduğu düşünülerek, ince dokunmuş bir at kılı kullanılmıştır. Ancak sonrasında büyük ölçekli üretime geçildiğinde döşeme için Eisengorn ya da Ironcloth ticari adıyla pazarlanan bir malzeme de kullanılmaya başlanmıştır. Bu materyal kanvas benzeri bir döşeme malzemesi olarak bilinmektedir (Wilk, 1981).

Breuer'in çelik boru mobilyayla birlikte getirdiği yenilikçi bakış açısı 20. yüzyılın ortalarında gelişen endüstriyel tasarım anlayışının temelini oluşturmuştur (Cvetkovski ve Sidorenko, 2019). Özellikle B32 modeli diğer bir adıyla Cesca Chair, yapısal sadeliği, ergonomik formu ve seri üretime uygunluğu ile bugün hâlâ çağdaş mobilya endüstrisinde kullanılmaktadır (Alkholy, 2024). Seri üretime geçilmesiyle birlikte mobilya artık sanat eseri olmaktan çıkmış, gündelik hayatın ulaşılabilir bir parçası haline gelmiştir (Wilk, 1981). Ancak tasarımların üretiminde kullanılan bağlantı elemanlarının ve döşeme malzemelerinin maliyetli olması, bu sandalyelerin kısa vadede yaygınlaşmasını zorlaştırmıştır (Şahinkaya, 2009).



Şekil 9. Çeşitli tasarımcılar tarafından tasarlanan, çelik boru konstrüksiyonlu konsol sandalyeler (Vulin Ilekovic ve Ilekovic, 2023)

Wassily Chair'in 1960'lı yıllarda Dino Gavina tarafından yeniden üretilmesiyle birlikte Breuer'in tasarımı "zamansız modern mobilya" kavramının bir simgesi haline gelmiştir (Cacciola, 2022). Bu süreç, modernist mobilya tasarımının yaygınlaşmasında önemli bir dönüm noktası olmuştur. Bu bağlamda Wassily Chair, yalnızca bir tasarım objesi değil, aynı zamanda bir paradigma değişiminin fiziksel karşılığı olarak değerlendirilmektedir. Bükülebilir çelik borular, modernizmin, teknolojinin ve seri üretimin geleceğini temsil etmektedir. Bu, Breuer'in tasarım vizyonunun temel yapı taşlarından biridir ve modern mobilya tarihinde hâlâ yankılanmaktadır (Tóth, 2013).



Şekil 10. Marcel Breuer tarafından sırasıyla 1925, 1926 ve 1928 yıllarında tasarlanan Wassily Chair (B3), B5 Chair ve Cesca Chair (URL 10, 2013; URL 11, 2025; URL 12, 2025)

Marcel Breuer'in öncülüğünde gelişen çelik boru mobilya anlayışı 20. yüzyılda modernizmin sembolü haline gelmiştir. Bu anlamda çelik boru mobilya üretiminin dönemin tasarım anlayışını tamamen değiştirdiği ifade edilebilir. Ahşap işçiliği ve geleneksel üretim yöntemlerinden uzaklaşan çelik bükme mobilya tasarımlarıyla birlikte mobilyaların toplumsal anlamda erişilebilirliği de artmıştır. Breuer'in yenilikçi malzeme kullanımı ve üretim odaklı yaklaşımı bugünün sürdürülebilir ve rasyonel tasarım arayışlarına ilham vermektedir. Breuer'in arkasında bıraktığı izler biçimsel ve estetik bir stilin değil aynı zamanda düşünsel bir yaklaşımın ve üretim tekniğinin temsili olarak hala güncelliğini korumaktadır.

3.3.1. Çelik boru mobilyaların iç mekânda kullanımı

Breuer'in tasarımları yalnızca mobilya endüstrisinde değil aynı zamanda mimarlık ve içmimarlık disiplinlerinde de etkili olmuştur. Bauhaus'un disiplinlerarası anlayışı sayesinde, mobilya artık yalnızca bir eşya değil, bir mekânın deneyimsel ve düşünsel uzantısı olarak görülmeye başlanmıştır (Ertas Beşir ve Dereci, 2021). Breuer'in çelik mobilyaları, "mekânda boşluk" fikriyle birlikte okunmuş; şeffaflık, hafiflik ve yapısal görünürlük gibi modernist değerlerle bütünleşmiştir (Tóth, 2013). Özellikle Marcel Breuer'in Wassily Chair ve Cesca Chair gibi tasarımları, mekân içinde hem görsel hafiflik hem de yapısal netlik sunarak içmimarlıkta yeni bir dönem başlatmıştır (Wilk, 1984). Bu mobilyalar, iç mekânda boşlukla kurdukları ilişki sayesinde, kalabalık hissi yaratan klasik donatı elemanlarına alternatif olarak açıklık, şeffaflık ve akışkanlık sunmuştur (Giovannelli, 2023). Çelik boruların bükülmesiyle elde edilen formlar ve ortaya çıkan mobilyalar, mekânın içindeki varlığını görsel olarak azaltmasına karşın, işlevselliğini sürdürmüştür. Bu durum, modern konutlarda ya da kamusal alanlarda kullanıcıya daha esnek ve düzenlenebilir bir yerleşim imkânı sunmuştur (Tóth, 2013). Bazı mobilya tasarımları, belirli binaların iç mekânlarının ayrılmaz ve orijinal bir parçası olarak yaratılmış olmasına karşın, bazıları belirli bir mekânla herhangi bir ilişkisi olmaksızın, küçük ama zorlu bir tasarım görevine verilen yaratıcı yanıtlar olarak ortaya çıkmıştır (Vulin Ilekovic ve Ilekovic, 2023). Bu durum iç mekânın bütüncül, kendine has ve biricik tasarımı ile endüstriyel tasarımın tekil ve seri üretime yakınlığı arasındaki benzer ama

birbirinden farklı iki tasarım disiplinine işaret etmektedir. Her iki senaryoda da mobilyaların mekânın kurgusuna, tasarım diline ve atmosferine doğrudan katkıda bulunduğunu söylemek mümkündür (Şekil 11).



Şekil 11. St. John's Üniversitesi, Alcuin Kütüphanesi, Hedrich-Blessing Koleksiyonu, Chicago Tarih Müzesi (Bergdoll, 2018)

Bu mobilyaların hafiflikleri ve geometrik formları, dönemin mekânsal tasarım anlayışıyla bütünleşen bir iç mekân dili oluşturmuştur (Tóth, 2013; Ertaş Beşir ve Dereci, 2021). İç mekân çelik bükme mobilyaların kullanımı, biçim ve malzeme anlamında yakaladığı yenilikçi bakış açısının yanı sıra, kullanıcı deneyimi bağlamında da bir dönüşüme sebep olmuştur. Geleneksel masif mobilyaların ağır ve sabit yapısına karşın bu mobilyalar daha hafif, kolay taşınabilir ve uyarlanabilir olmaları, özellikle modern yaşamın ihtiyaç duyduğu dinamik ve esnek yerleşim biçimlerine olanak tanımıştır (Şahinkaya, 2009). Örneğin, kolçak, sırtlık ve oturma yüzeylerinin bağımsız olarak tasarlandığı çelik boru mobilyalar, modülerlik fikrini destekleyerek mekân içinde yeniden düzenlenebilir sistemlerin öncüsü olmuştur (Ottillinger ve Jervis, 1989). Ayrıca yine Bauhaus'un disiplinler arası yaklaşımı sayesinde, bünyesindeki mobilya ve tekstil atölyeleriyle yapılan iş birliğiyle birlikte çelik mobilyalar iç mekânlara uygun hale getirilmiştir. Breuer'in tekstil atölyesiyle birlikte yürüttüğü bu ortak çalışmalar, özellikle sandalye ve koltukların sırtlık, oturma ve yüzey kaplamalarının konfor ve estetik açısından geliştirilmesini sağlamıştır (Ertaş Beşir ve Dereci, 2021). Bu anlamda çelik bükme mobilyalar, iç mekânda yalnızca yapısal olarak değil, aynı zamanda dokunsal ve duyuşsal bir zenginlik de sunmuştur (Şekil 12).



Şekil 12. Cap D'Antibes Sahil Oteli, Bernard Dubois Architects (URL 13, 2023)

Günümüzde de iç mekânlarda sıklıkla tercih edilen Breuer tasarımları, modern konutlardan sanat galerilerine, ofislerden kafelere kadar çok çeşitli işlevlere sahip mekânlarda uygulanmakta, çelik borunun yalın dili ile mekâna zamansız bir karakter kazandırmaktadır (Giovannelli, 2023). Özellikle yalın çizgilerle mekânı bölmeden tanımlama becerisi, çelik bükme mobilyaları çağdaş mekânların vazgeçilmezi kılmaktadır.

4 Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen bulgulara göre;

- Bükme tekniğiyle şekillendirilen ahşap ve çelik boru mobilyalar tasarımcılara hem biçimsel hem teknik anlamda çeşitli olanaklar sunmaktadır. Bu yöntemle modernist, çizgisel, hafif, dayanıklı, işlevsel ve estetik mobilyalar tasarlanmış ve üretilmiştir.
- Bükme ahşap ve çelik boru mobilyalar üretim yöntemlerindeki yenilikleri ile olduğu kadar sahip oldukları yeni biçimsel ve işlevsel özellikleri bakımından mobilya tasarımı tarihinde birer dönüm noktasını temsil etmektedir.
- Bükme mobilya üretim tekniği, mobilya tasarımı alanında önemli gelişmeler yaşanmasına katkıda bulunmuştur. Başta Michael Thonet'in ve Marcel Breuer'in sandalyeleri olmak üzere hem bükme ahşap hem de çelik boru mobilyalar kendi üretim modellerinin öncülüğünü yapmıştır.
- Michael Thonet ve Marcel Breuer tarafından tasarlanan bükme ahşap ve çelik boru mobilyalar tasarlandıkları günden bu yana çeşitli işlevlere hizmet eden mekânlarda kullanılmıştır. Söz konusu mobilyaların üretimi mobilya üreticisi firmalar tarafında devam etmekte ve günümüz iç mekânlarında da sıklıkla kullanılmaktadır.
- Çalışmanın, günümüzde kullanılan çeşitli bükme mobilya üretim teknikleri ile ilgili yeni araştırmalara katkıda bulunacağı ve bu doğrultuda tasarımcıların bükme tekniğini mobilya tasarımlarında kullanabileceği öngörülmektedir.

Yazar Katkıları

Feyza Mendi: Araştırmanın yapılması, Analizlerin yapılması, Kaynaklar, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma. **Ayşe Seda Çalışkan:** Araştırmanın yapılması, Analizlerin yapılması, Kaynaklar, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma, **Onur Ülker:** Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), Metodolojinin belirlenmesi, Veri iyileştirme, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Makale inceleme ve düzenleme.

Finansal destek beyanı

Finansal destek alınmamıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- Alkholy, I., (2024). Theorizing the chair: history, culture, and design, evolutionary studies in imaginative culture, DOI: [10.70082/esiculture.vi.1553](https://doi.org/10.70082/esiculture.vi.1553)
- Barros, M., Duarte, J.P., and Chaparro, B., (2011). Thonet chair design grammar: A step towards the mass customization of furniture, 14th CAAD Futures Conference, ULiege, Belgium.
- Bergdoll, B., (2018). Marcel Breuer and the invention of heavy lightness. Places Journal. <https://placesjournal.org/article/marcel-breuer-and-the-invention-of-heavy-lightness/>

- Cacciola, D., (2022). Marcel Breuer, the Wassily chair and the ‘frozen’ Bauhaus modernism after 1945. *Journal of Design History*, Advance online publication, DOI: [10.1093/jdh/epac001](https://doi.org/10.1093/jdh/epac001)
- Cvetkovski, A., and Sidorenko, S., (2019). Similarities and differences in terms of the geometry used in De Stijl and Bauhaus product designs, *SEE Journal of Architecture and Design*, 10041, 1–6. DOI: [10.3889/seejad.2019.10041](https://doi.org/10.3889/seejad.2019.10041)
- Ertaş Beşir, S., ve Dereci, Ş., (2021). Bauhaus Döneminde Mobilya ve Tekstil Atölyeleri Arasındaki Disiplinlerarası İş Birliği Marcel Breuer Örnekleme, *Art-e Sanat Dergisi*, 14(27), 453-472, DOI: [10.21602/sduarte.893955](https://doi.org/10.21602/sduarte.893955)
- Fırat Ezenci, Z., and Özkaraman Şen, M., (2018). Tasarım tarihinde zamansız mobilya tasarımlarının günümüze yansımaları, *Tasarım ve Tasarım Tarihi Sempozyumu Bildirileri (UTAK 2018)* (pp. 609–627). Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Giedon, S. ve ark., (1990). Tubular steel furniture: antecedents and early history, *Journal of Design History*, Sayı 3, s.166-170.
- Giovannelli, A. (Ed.), (2023). Dissecting Breuer: The Whitney’s formal manipulations Lettera Ventidue Edizioni.
- Han, Y.-H., (2004). A study on characteristics of making process of bentwood furniture, *Korean Institute of Interior Design Journal*, 13(6), 140–149.
- Hassenpflug, G. ve ark., (1990). The materials of furniture: wood or metal? *Journal of Design History*, Sayı 3, s.162-165.
- Kang, H. G. (2010). A study on the technique and process of bending wood, *Journal of the Korea Furniture Society*, 21(6), 459-468.
- Kayacan, B., Özel, Y., ve Irmak, Y., (2016). Geçmişten günümüze montajı kullanıcı tarafından yapılan mobilyaların sektördeki yeri, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 15(30), 153-166.
- Kertemelidou, P., (2018). Exhibiting an everyday industrial object in the museum the case of Thonet No.14 chair, *Museum Management and Curatorship*, 33:2, 136-145, DOI: [10.1080/09647775.2018.1428819](https://doi.org/10.1080/09647775.2018.1428819)
- Kırkpınar, G., Akgün, Y., and Pedergrana, M. J., (2025). Experimental analysis of the bending behavior of woods with kerf-cutting technique, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 8(1), 17-29, DOI: [10.33725/mamad.1643493](https://doi.org/10.33725/mamad.1643493)
- Mutdoğan, A. S., ve Elibol, G. C., (2023). Kabriyal ayağın mobilya tarihindeki yeri, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 289-304; DOI: [10.33725/mamad.1359471](https://doi.org/10.33725/mamad.1359471)
- Namichev, P., and Petrovski, M., (2019). Wood as a primary selection of material for furniture Production, *Journal of Process Management and New Technologies*, 7(4).
- Noblet, J. (ed.). (1993). *Design, miroir du siècle*, Flammarion / APCI, Paris.
- Oates, P.B. (1981). *The story of western furniture*, Herbert Press, London.
- Ottillinger, E. B., and Jervis, S. (1989). August Kerschelt's metal furniture factory and Viennese metal furniture in the nineteenth century, *Furniture History*, 25, 235–249.
- Özkan, K., and Öztürk, B. (2023). The effect of modernism movement on iconic furniture design, *The Turkish Online Journal of Design Art and Communication*, 13(3), 690–699.

- Thonet GmbH Germany., (2025). Story, <https://www.thonet.de/en/company/story> , 10 Mayıs 2025 tarihinde erişildi.
- Thonet GmbH Germany., (2025). Original, <https://www.thonet.de/en/company/original>, 10 Mayıs 2025 tarihinde erişildi.
- Tóth, E., (2013). Breuer's furniture, Moholy-Nagy's photographic paradigm, and complex gender expressivity at the Haus am Horn. Grey Room, 50(7), 90–111. DOI: [10.1162/GREY_a_00097](https://doi.org/10.1162/GREY_a_00097)
- URL 1, (2019). <https://www.mutualart.com/Artwork/SESSEL-NR-4/F73B6D82CAB1DE2D> 9 Ağustos 2025 tarihinde erişildi.
- URL 2, (2024). <https://snl.no/wienerstol> , 10 Ağustos 2025 tarihinde erişildi .
- URL 3, (2012). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thonet_chair_no.18.jpg , 9 Ağustos 2025 tarihinde erişildi.
- URL 4, (2022). <https://picryl.com/media/cafe-griensteidl-1896-01f149> , 22 Temmuz 2025 tarihinde erişildi.
- URL 5, (2021). <https://picryl.com/media/henri-de-toulouse-lautrec-at-the-moulin-rouge-d3003d>, 25 Temmuz 2025 tarihinde erişildi.
- URL 6, (2024). https://lex.dk/Alvar_Aalto , 9 Ağustos 2025 tarihinde erişildi.
- URL 7, (2023). <https://www.esada.es/disenadores/701-ray-eames-la-visionaria-del-diseno-de-interiores>, 24 Kasım 2025 tarihinde erişildi.
- URL 8, (2020). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hans_J_Wegner_Wishbone_Chair.jpg, 8 Ağustos 2025 tarihinde erişildi.
- URL 9, (2017). <https://www.claessonkoivistorune.se/projects/hotel-zander-k/> 9 Ağustos 2025 tarihinde erişildi.
- URL 10, (2025). https://www.knoll.com/shop/en_us/living-lounge-chairs/wassily-chair/376945.html?sku=376945 , 6 Ağustos 2025 tarihinde erişildi.
- URL 11, (2013). <https://www.cooperhewitt.org/2013/06/29/the-b5-chair/>, 7 Ağustos 2025 tarihinde erişildi.
- URL 12, (2025). https://www.knoll.com/shop/en_us/dining-dining-chairs/cesca_chair/2020.html , 6 Ağustos 2025 tarihinde erişildi.
- URL 13, (2023). <https://www.sightunseen.com/2023/06/design-hotels-cap-d-antibes-beach-hotel-bernard-dubois/> 7 Ağustos 2025 tarihinde erişildi.
- Vulin Ileković, D., and Ileković, B., (2023). Chair architectonics: Architects in the development of three typological and morphological chair designs, *Prostor*, 31(2[66]), 224–235, DOI: [https://doi.org/10.31522/p.31.2\(66\).7](https://doi.org/10.31522/p.31.2(66).7)
- Wilk, C. (1981). *Marcel Breuer: Furniture and interiors*, the museum of modern art.



Brief review of bamboo particle-based composites: parameter and performances

Juliana Abdul Halip^{1,2*} , Mohd Nazrul bin Roslan¹ , Azrin Hani Abdul Rashid¹ ,
Noor Aslinda Abu Seman³ , Nurazwa Ahmad⁴ , Ambigaipagan Nagasamy⁵ 

ABSTRACT: Bamboo is a non-wood material, known as a fast-growing plant with great potential in sustainable composite production. This brief review synthesizes recent studies (2019-2025) on bamboo-particle composites and more on conventional bamboo particle-based composites, specifically focusing on composite types like sandwich particleboard and single-layer particleboard. The primary objective is to explore their materials, resulting properties, manufacturing processes, and development trends. This review examines materials typically bonded with synthetic adhesives (e.g., amino-plast, phenolic resins and non-formaldehyde resins), which are suitable for cost-effective applications. The study covers the influence of various bamboo species, processing parameters (e.g., particle size and density), and adhesive types to establish the crucial parameter-to-property relationships that govern performance. It focuses on bamboo particle materials that complement engineered bamboo production while positioning bamboo as a low-cost, high-performance substitute for conventional wood panels. This brief review is a valuable resource for researchers and industry stakeholders, including particleboard and furniture manufacturers, seeking to utilize bamboo as an eco-friendly alternative.

Keywords: bamboo, particle, composites, furniture

Bambu parçacık bazlı kompozitlerin kısa bir incelemesi: parametre ve performanslar

ÖZ: Bambu, sürdürülebilir kompozit üretiminde büyük potansiyele sahip, hızlı büyüyen bir bitki olarak bilinen, odun dışı bir malzemedir. Bu kısa derleme, bambu parçacık kompozitleri ve özellikle sandviç yonga levha ve tek katmanlı yonga levha gibi kompozit türlerine odaklanarak, geleneksel bambu parçacık bazlı kompozitler üzerine yapılan son çalışmaları (2019-2025) sentezlemektedir. Birincil amaç, bu malzemelerin ortaya çıkan özelliklerini, üretim süreçlerini ve gelişim trendlerini incelemektir. Bu inceleme, maliyet etkin uygulamalar için uygun olan sentetik yapıştırıcılarla (örneğin, amino-plast, fenolik reçineler ve formaldehit içermeyen reçineler) tipik olarak yapıştırılan malzemeleri incelemektedir. Çalışma, performansı belirleyen önemli parametre-özellik ilişkilerini oluşturmak için çeşitli bambu türlerinin, işleme parametrelerinin (örneğin, parçacık boyutu ve yoğunluğu) ve yapıştırıcı türlerinin etkisini kapsamaktadır. Bambuyu geleneksel ahşap paneller için düşük maliyetli, yüksek performanslı bir alternatif olarak konumlandırırken, mühendislik ürünü bambu üretimini tamamlayan bambu parçacık malzemelerine odaklanmaktadır. Bu kısa inceleme, bambuyu çevre dostu bir alternatif olarak kullanmayı hedefleyen araştırmacılar ve sunta ve mobilya üreticileri de dahil olmak üzere sektör paydaşları için değerli bir kaynaktır.

Anahtar kelimeler: Bambu, Yonga, Kompozitler, Mobilya

Article history, Received: 24.09.2025, Revised: 05.11.2025, Accepted: 08.11.2025, Published: 20.12.2025, *julianaah@uthm.edu.my

¹Faculty of Engineering Technology, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM) Pagoh Campus, 84600 Panchor, Johor, Malaysia

²Institute of Tropical Forestry and Forest Products (INTROP), Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor, Malaysia

³Johor Business School, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 86400 Batu Pahat, Johor, Malaysia

⁴Faculty of Technology Management and Business, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 86400 Batu Pahat, Johor, Malaysia

⁵Evergreen Fibreboard Berhad, PLO 22, Parit Raja Industrial Estate, Batu Pahat, Johor, 86400, Malaysia

To cite: Juliana, A.H., Mohd Nazrul, R., Azrin Hani, A.R., Noor Aslinda, A.S., Nurazwa, A., and Ambigaipagan, N (2025). Brief review of bamboo particle-based composites: parameter and performances, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 8 (2), 487-499, DOI: [10.33725/mamad.1789197](https://doi.org/10.33725/mamad.1789197)

1 Introduction

For decades, Malaysia's wood-based industries, especially the furniture industry, have relied on wood, namely rubberwood as a raw material in composites manufacturing, especially particleboard and medium-density fibreboard (MDF) industries. Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) is used mainly for furniture as a light hardwood and has pale cream in colour with good machining properties (Nair, 2020). However, most researchers are currently looking for alternative materials due to the depletion of the log supply. Bamboo has been used as a sustainable alternative wood material, owing to its promising properties and wide availability in tropical regions. There are approximately 123 genera and more than 1500 species of bamboo worldwide (Ahmad et al., 2021). Globally, bamboo resources cover an estimated 31.5 million hectares, accounting for about 0.8% of the total global forest area (Fahim et al, 2022). In their study, most of this bamboo thrives in the Asia-Pacific region, with the largest tracts concentrated in India and China. Additionally, the Americas host significant diversity, boasting around 430 different species of woody bamboo that are spread across South, Central, and North America. Bamboo composites have gained significant attention in recent years due to their promising properties in various applications. It is due to its rapid growth, high strength-to-weight ratio, and has emerged as a renewable alternative to traditional wood or timber (Nayak et al., 2013). The presence of bamboo as a material in composite will not only provide low dependability of logs but also unlock good opportunities for high-performance applications by leveraging the unique properties of bamboo combined with modern composite technologies.

The development of bamboo-based materials can be categorized into conventional and advanced bamboo composites, each offering distinct advantages and applications. Conventional bamboo composites primarily include particleboard, sandwich boards, oriented strand board (OSB), fibreboard, and plywood. These materials are manufactured by combining bamboo fibers with adhesives or resins, offering strength and stability suitable for construction and interior design applications (Santhosh et al., 2022). Bamboo particleboard, for example, is produced by binding bamboo particles with a resin, and it has been found to exhibit comparable properties to conventional wood-based particleboards (Li et al., 2019). The uses of polymeric resins, such as epoxy and polyester, as matrices for bamboo materials offer significant potential for applications in sectors such as automotive parts (Yu et al., 2024).

Nevertheless, the scope of this review paper is delimited to bamboo particle materials utilized in conventional composites as documented in the literature over the preceding five-year period (2019 to 2025). This recent review highlights the importance of bamboo as a particle-based material for composites, given its role in sustainable waste management and its capacity to serve as a direct, low-cost substitute for traditional wood panels. This review also categorized the bamboo-particle composite into two types: sandwich particleboard and single layer particleboard, which differentiates the review from the previous review done by Gauss et al. (2019). Additionally, the manufacturing of bamboo particle-based composites can be considered as a quite interesting option to complement the engineered bamboo production chain. Krug et al (2023) note that the following material types fall under particle-based materials: particleboard, extruded particleboard, molded particleboard, and OSB. Therefore, the main aim of this research on bamboo particle composites is to guide particleboard manufacturers, furniture manufacturers, and supporting researchers seeking to use bamboo as a durable, cost-effective substitute for conventional wood.

2 Bamboo-particle composites

Over the past decade, numerous studies have explored the potential of bamboo in the development of sustainable composite materials. Table 1 tabulates the previous studies on bamboo-particle composites in general. However, Table 1 primarily details previous studies on advanced polymer-bamboo-particle composites, as the data for conventional bamboo-particle composites will be covered in the following chapter. As shown in Table 1, the focus of bamboo studies can be varied to various types of composites, ranging from conventional to advanced polymer reinforced composites. Most conventional composites focused on bamboo particleboard manufactured with synthetic thermosetting adhesives, namely urea formaldehyde, phenol formaldehyde, bio-polyurethane adhesive and unsaturated polyester resin. Therefore, bamboo particles can yield composites with various mechanical strength comparable to or superior to traditional wood-based panels (Suwon et al., 2020; Wu et al., 2020).

Table 1. Previous studies on bamboo-particle composites

Focus of study	Materials and Binder	Key Findings	Authors
Effect of particle size and hot-pressing parameters on properties of bamboo composite	Bamboo particle, and zein solution	Larger particles contribute to better mechanical properties of bamboo composite	Lu et al. 2025
Bamboo-based polymer composites for automotive applications	Bamboo fibers, and polymers	Demonstrated that bamboo reinforced polymer composite exhibit corrosion resistance compared to traditional materials and offer lightweight suitable for automotive parts.	Yu et al. 2024
Bamboo particle blending system on the properties of its composites	Bamboo particles, and phenol-formaldehyde (PF) resin	The bamboo particle composite performance met the standard requirements for furniture particleboard, and the potential exists to further improve its thermal properties.	Zhao et al. 2023
Bamboo fiber reinforced polymer composites	Bamboo fiber, and epoxy resin	Investigated the reinforcement of bamboo fibers with epoxy resin, achieving enhanced tensile and flexural strength in the composites.	Mousavi et al. 2022
Fabrication of bamboo polymer composite panels	Bamboo fibers, and polyester resin	Highlighted that the combination of bamboo fibers with polyester resins has potential engineering applications	Santhosh et al. 2022
Development of new particleboard made from bamboo and sesame stalk	Bamboo particle, sesame stalk, and urea formaldehyde (UF) resin	The internal bonding strength, water absorption, and thickness swelling highly depending on particle size where the decreasing of particle size exhibit better internal bonding & stability.	Legesse et al. 2021
Properties of bamboo particleboard	Bamboo particles, and bio-polyurethane adhesive	Particleboard was made from bamboo waste combined with bio-polyurethane adhesive based on recycled palm oil	Suwan et al. 2020
Bamboo particleboard bonded with formaldehyde-free adhesive	Bamboo particles, and unsaturated polyester resin	The mechanical properties of bamboo particleboard significantly improved when using unsaturated polyester resin, with better usability and higher efficiency	Wu et al. 2020
Properties of bamboo thermoplastic composite from six fractions of bamboo particles	Bamboo particle, and polypropylene (PP)	The processability, mechanical properties, creep-recovery, and dynamic viscoelasticity of the bamboo thermoplastic composite were influenced by the composition of the bamboo fractions	Tan et al. 2019

Meanwhile, numerous studies are also done on the manufacturing of advanced bamboo composites, where bamboo acts as reinforcement in matrix composites. Both thermoplastic and thermoset polymer matrices, such as epoxy, polyester, and polypropylene, can be used as polymer matrices for advanced bamboo composites (Santhosh et al., 2022; Bai et al., 2022; Yu et al., 2024). According to our observations, the use of bamboo particles in advanced composites ranges from 40 to 250 mesh sizes. However, different mesh sizes are attributed to different properties (Martijanti et al., 2021). Advanced bamboo-particle polymer composites could achieve high-strength and weather-resistant properties, and lightweight properties allow bamboo composites to be considered for automotive parts application (Lu et al., 2018). While hybridization of bamboo fiber and epoxy resin results in composites with better tensile and flexural strength (Mousavi et al., 2022). From these studies, a clear path of bamboo-particle composite is observed, whereas the use of bamboo in composite manufacturing can provide optimized mechanical performance, environmental resistance, and application-specific functionality.

3 Conventional bamboo-based particle composite

Particles are one of the wood elements in wood composite manufacturing. Many types of wood particles can be used in composites, either as main constituents or as reinforcement elements, namely chips, particles, strands, fibres, and flakes (Stark and Cai, 2010). Different types of wood elements normally give diversity in their properties with different processing challenges. Particleboard also known as wood-based composite, or biocomposite, or engineered wood product fabricated by combining wood chips, particles, or other lignocellulosic particles with synthetic thermosetting adhesives.

Particleboard is produced by mechanically reducing the wood raw material into small particles, applying adhesive to the particles, and consolidating a loose mat of the particles with heat and pressure into a panel product (Stark and Cai, 2010). The production process for bamboo particles begins with harvesting and cutting the bamboo (Figure 1) Then, the process will be based on bamboo elements, namely particles or strand forms. Particles are usually produced from culms (node and internode) and bamboo processing residues, while long strands are produced by cutting the culm into strands using a bandsaw. Before mixing and forming, the particles need to be screened and dried up to 5-8% moisture content (MC). The particles will be blended with thermosetting adhesive and then subjected to heat and pressure, allowing the adhesive to cure and bond the particles into a solid panel. The performance of the particleboards normally varies by the geometry of the particles, resin levels, density of the board, and manufacturing processes (Owodunni et al., 2020). Interestingly, particleboard represents one of the earliest and most cost-effective methods of composite production, as the raw material can be varied, ranging from wood to any lignocellulosic materials such as bamboo.

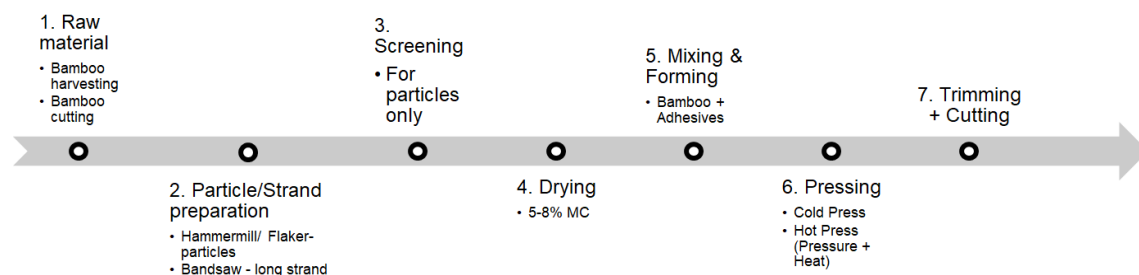


Figure 1. Manufacturing process of conventional bamboo-based particle composites

Table 2. Bamboo species, composite types, parameters and properties of bamboo-based particle composites

Bamboo spp	Mixture spp	Particle length (cm)	Composite type	Binder/ Adhesive	Resin level (%)	Board density (kg/m ²)	Properties					Author
							TS	WA	MOR (MPa)	MOE (MPa)	IB (MPa)	
Lowland bamboo (B)	Coffee husk & maize cob	0.075-0.3	Particleboard	UF*	12	449-871	n/a	20	55	n/a	n/a	Muche & Gebremedhen, 2025
								31	25			
								15	73			
								44	15			
								24	38			
Bamboo waste	Durian husk	0.05-0.2	Particleboard	UF*	7	650	23	n/a	14	n/a	0.31	Tang & Nguyen, 2025
					8		22-		13-16		0.33	
					11.5		23		14-17		0.36	
					15		21-		16-17		0.40	
					16		22		17		0.43	
Bamboo	n/a	n/a	Particleboard	Plant oil-based adhesive	16	750	16.3	n/a	16.3	2510	0.82	Zhang et al 2024
					18		15.2		18.4		1.07	
					20		12.4		19.5		1.26	
<i>Phyllostachys Bambusoides</i>	n/a	4-8	Sandwich particleboard Face- strip Core- flake	Methylene diphenyl diisocyanate (MDI) resins, Polyurethane adhesive	7.5-9.5	550-650	n/a	n/a	9.5 - 32	2097-8431	0.01-0.08	Gholizadeh et al, 2023
<i>Dendrocalamus asper</i> strand	Balsa wood	9	Sandwich particleboard	Castor oil polyurethane + isocyanate	8	650	20	49	28	5804	0.73	Barbirato, 2022
					10 12		13	29	40	6955	0.96	
					15		10	29	50	8393	1.38	
							8	24	43	6579	1.32	
<i>Gigantochloa pruriens</i> strand (Face)	Kemenyan wood (Styrax sumatrana) (Core)	7.5-25	Particleboard	Isocyanate	7	640-680-620-670	6.5-	46-	11-22	3340-	0.2-	Iswanto et al 2022
							7.4	68	43-48	5280	0.3	
							7.0-	31-		6910-	0.1-	
							9.6	46		13630	0.2	
<i>Dendrocalamus asper</i>	n/a	2 (fine) 10 (coarse)	Particleboard	Isocyanate resin of diphenylmethane diisocyanate	2	800	6.9	65	13.7	1330	0.57	Karlinasari et al, 2021
Belangke bamboo (<i>Gigantochloa pruriens</i>) Strand (Face)	Raru wood	25	Sandwich particleboard	Isocyanate	7	680-750	3.9-9.1	34-63	442-825	53522-95730	1.46-3.80	Iswanto et al 2021
Semantan bamboo (<i>Gigantochloa scortechinii</i>)	n/a	1-3	Particleboard	UF* (U) & MUF* (M)	3.5U	600	29	98	9.5	1455	0.46	Bahari et al 2021
					5U		20	82	11.4	1500	0.56	
					3.5M		27	98	10.9	1463	0.44	
					5M		20	78	16.2	1831	0.72	
Belangke bamboo (<i>Gigantochloa pruriens</i>), Tali bamboo (<i>Gigantochloa apus</i>)	Sugar palm fiber, Bagasse, Cornstalk	2.5-5	Sandwich particleboard	Isocyanate	8	750	8.3-22.9	40-80	15-43	2404-4303	0.03-0.40	Iswanto et al, 2020
<i>Dendrocalamus asper</i> strand (mesh*)	n/a	0.05-0.02	Particleboard	UF*	10	650	9.3	42	7.6	981	0.25	Bazzetto et 2019
							8.9	44	7.2	927	0.27	
							8.9	44	6.0	774	0.28	
							9.4	45	5.2	693	0.26	
Belangke bamboo (<i>Gigantochloa pruriens</i>) (Face)	Corn stalk (Core)	5	Sandwich particleboard	Isocyanate	8	700	15.5	57	71	20311	0.73	Iswanto, & Ompusunggu, 2019
		10					14.5	47	333	42156	1.00	
		15					12.2	41	309	35360	1.14	
		20					7.0	38	322	30875	1.21	
Rubberwood (Control)	n/a	n/a	Particleboard	UF*	10	700	44.1	115	9.3	1543	0.76	Huaxu et al, 2020

Table 2 shows the bamboo species, composite types, parameters and properties of conventional bamboo-based particle composites reported in studies conducted over the past. Rubberwood particleboard bonded with 10% urea formaldehyde is included as a control board. As a result of observations, four main species have been studied, namely *Phyllostachys bambusoides*, *Dendrocalamus asper*, *Gigantochloa pruriens*, and *Gigantochloa scortechinii*; some of the bamboos are not mentioned specifically. Most of the studies developed sandwich particleboards with a mixture of wood and non-wood species (Iswanto and Ompusunggu 2019; Iswanto et al., 2020; Iswanto et al., 2021; Gholizadeh et al., 2023; Barbirato, 2022; Iswanto et al., 2022), and some produced single-layer particleboard without any mixture of wood species (Bazzetto et al. 2019; Bahari et al. 2021; Zhang et al. 2024). Urea formaldehyde (UF) and isocyanate resins are among the most used by the previous studies as a binder of bamboo-based particleboard. Apart from that, melamine urea formaldehyde (MUF), plant oil-based adhesive, methylene diphenyl diisocyanate (MDI) resins, polyurethane adhesive, and a combination of castor oil polyurethane and isocyanate resins are used.

3.1 Bamboo sandwich particleboard

For sandwich type particleboard, most bamboo particles, strands or strips are used as the face of the composite, and the core consists of wood or non-wood particles. Bamboo can contribute to high bending strength on the particleboard due to the denser structure of the bamboo strand on the surface layer of the sandwich particleboard (Iswanto et al. 2017). Gholizadeh et al. (2023) investigated bamboo-based lightweight dense wall panels sandwich particleboard made from *Phyllostachys bambusoides* using the Response Surface Methodology method. In their study, they used bamboo particles/flakes as core layers and combined with thin wall bamboo strips as face layers and investigated the effects of three variables, namely density of core layer, resin consumption in core layer, and resin consumption in faces, on the physical, mechanical and thermos-acoustic properties of the sandwich particleboards. The optimized panels achieved a modulus of rupture (MOR) of 17.16 MPa and a modulus of elasticity (MOE) of 5.669 MPa, indicating good bending performance. Internal bonding strength was recorded at 0.02 MPa, while compressive strengths were 17.60 MPa (parallel) and 1.83 MPa (perpendicular). The panels also showed screw-holding strength of 913.3 MPa and shear strength of 0.03 MPa. The results were reported to comply with relevant EN and DIN standards, confirming their potential for non-load-bearing wall applications.

Barbirato (2022) investigated sandwich-style oriented strand board from wood waste, specifically balsa wood residues and bamboo bonded using castor-oil polyurethane resin. In his study, the mechanical and physical properties, including MOR, MOE, IB, TS and WA, were evaluated. Results showed that the board met the minimum structural requirements by European standard EN 300:2006, whereas the flexural stiffness of the board was approximately 56 % higher in the longitudinal direction than transversely, with finite-element modeling aligning closely (66 % difference). His research revealed that sandwich-type oriented strand board can be used in structural, flooring, and ceiling applications. Iswanto et al. (2022) produced three-layer particleboards using bamboo strands as a surface and kemenyan wood as the core part with targeting densities of 620–690 kg/m³. In general, using belangke bamboo strands as a surface layer resulted in higher MOE and MOR values compared to uncoated boards. The use of belangke bamboo as a coating can increase the MOE and MOR values by 16 and 3 times, respectively.

Meanwhile, Iswanto et al. (2021) examined the performance of soaked raru wood and belangke bamboo particles using acetic acid and NaOH solutions (at 0, 1, 2 and 3%

concentrations) before the manufacturing of three-layer sandwich particleboards (40% bamboo face, 20% raru wood core, 40% bamboo back, 7 % isocyanate adhesive, ad hot pressed at 160 °C). They found that the chemical pre-treatment significantly influenced the physical properties, namely density (0.68–0.75 g/cm³), moisture content (4.6–5.4 %), water absorption (34–63 %), and thickness swelling (3.9–9.1 %), all of which mostly met JIS A 5908 standards. Additionally, the treatment also significantly affected the mechanical performance; improved MOE ranged from 53,500 to 95,700 kg/cm², MOR from 443 to 825 kg/cm², and IB from 1.46 to 3.80 kg/cm². Higher acid concentration slightly reduced MOR, while NaOH treatment yielded the highest MOE. Overall, treated boards, particularly those soaked in 3 % acetic acid and NaOH demonstrated, enhanced dimensional stability and mechanical strength, confirming compliance with standards.

In another study done by Iswanto et al. (2020), they have conducted a study on three-layer sandwich particleboards combining belangke and tali bamboo strands on faces with non-wood fibers (sugar palm, cornstalk, sugarcane bagasse) in the core, bonded with 8% isocyanate resin and hot-pressed at 160 °C for 5 minutes under 3 MPa. They evaluated MOR, MOE, IB, WA, TS, and sound absorption according to JIS A 5908 and ISO 11654 standards. Most sandwich particleboard types meet JIS standards except for TS and IB. The board made from belangke bamboo and cornstalk exhibited the lowest thickness swelling, while the board made from belangke bamboo and sugarcane bagasse showed the best overall mechanical strength. Acoustic testing revealed that a board made from tali bamboo and sugar palm fiber achieved superior sound absorption. This demonstrates that incorporating bamboo strands and non-wood fibers can yield dimensionally stable, mechanically robust, and acoustically effective, environmentally friendly panels.

The effect of particle length on three-layer bamboo (belangke) and corn-stalk bagasse sandwich particleboard using 8% isocyanate resin, hot-pressed at 160 °C under 30 kg/cm² for 5 minutes to target 0.7 g/cm³ density was done by Iswanto and Ompusunggu (2019). In their findings, boards made with 10 cm particles performed best, achieving a MOE of 42,156 kg/cm² and a MOR of 333 kg/cm², while nearly all panels met JIS A 5908 standards except for IB and TS values. They concluded that longer particle length enhanced bending strength and stiffness but had a limited impact on IB and TS, suggesting optimal mechanical performance with that particle size.

In conclusion, studies on sandwich-type bamboo particle composites show that placing bamboo strands on the face layers significantly enhances bending strength and stiffness. A study by Gholizadeh et al. (2023) demonstrates that bamboo sandwich particle board has the ability to resist the tensile forces of screws, which are necessary for durable furniture connections. Meanwhile, hybridizing bamboo with wood or non-wood cores with chemical pre-treatment is one of the methods to optimize the properties of particleboard to achieve greater mechanical properties that comply with international standards (En & JIS), thus making them ideal for structural and furniture applications.

3.2 Single layer particleboard

As shown in Table 2, single layer particleboard, it can be produced either as single layer particleboard without any mixture of wood species (Bazzetto et al 2019; Bahari et al 2021; Karlinasari et al 2021; Zhang et al 2024), or single layer particleboard with a mixture of wood or non-wood species (Muche and Gebremedhen, 2025; Tang and Nguyen, 2025). Zhang et al. (2024) studied formaldehyde-free bamboo particleboards by using plant oil thermosetting adhesives synthesized from acrylated epoxidized soybean oil (AESO) and palm oil

dimethacrylate (MPOEA), enhanced with 2 isocyanethyl methacrylate (IEM) to improve crosslinking and bonding. The use of bamboo in particleboards improved the mechanical properties, dimensional stability, and good high temperature stability. The study confirmed that plant oil adhesives can yield bamboo particleboards with mechanical and physical performance comparable to traditional UF bonded counterparts, positioning them as viable, eco-friendly alternatives, especially for those bonded with 20% of plant oil-based adhesive.

Meanwhile, Bahari et al. (2021) evaluated 12 mm-thick particleboards made from *Gigantochloa scortechinii* bamboo particles bonded with either UF or MUF resin at low resin levels (3.5% and 5%). They reported that boards with 5% MUF resin performed best, showing a MOR of 16.19 N/mm² and MOE of 1830.8 N/mm², which is higher than those with UF or lower resin content. Only the 5% MUF samples achieved internal bond strength above the 0.60 N/mm² threshold (0.72 N/mm²). Although TS (19.8%) and WA (~78%) showed improvement with higher MUF levels, neither met the standard requirement. Karlinasari et al. (2021) investigated the physical and mechanical properties of single-layer particleboard panels made from Asian giant bamboo (*Dendrocalamus asper*) bonded using isocyanate resin at two different particle sizes (fine and coarse). Findings stated that the coarse particle panels generally exhibited superior physical and mechanical properties compared to the fine particle panels, except for internal bonding. Although the coarse particles showed higher mechanical values, the difference between the two particleboards was not statistically significant. The coarse particle panel exhibited better screw withdrawal values compared to the fine particleboard, suggesting better screw-holding properties, particularly for furniture applications.

Bazzetto et al. (2019) also manufactured 12 mm-thick particleboards from *Dendrocalamus asper* bamboo with particle sizes ranging from 0.05 to 0.02 cm. Findings show that the particle size had no significant effect on moisture content, density, TS after 24 h, IB, or screw holding strength, but smaller particles increased WA (at 2 and 24 h) and TS at 2 h while reducing MOR and MOE. None of the boards met the minimum MOR or MOE requirements for structural use, but satisfied the minimum requirement of TS after 24 h. The results indicate that finer bamboo particles impair bending performance and dimensional stability, suggesting that higher adhesive content or increased density are needed for structural applications.

Single-layer particleboard with a mixture of bamboo and non-wood species, namely coffee husk and maize cob, bonded with 12% urea formaldehyde and hot-pressed at 140 °C under 3.5 N/mm² was carried out by Muche and Gebremedhen (2024). Mechanical and physical properties are evaluated according to JIS A5908 and ASTM D1037 standards. The presence of 75% bamboo, 12.5% coffee husk, and 12.5% maize cob exhibited the best properties, achieving approximately 72.6 MPa MOR and 25.9 MPa compressive strength, which is 13–23% higher than control panels under dry conditions. Meanwhile, the highest physical properties, namely density, moisture content and WA are 871 kg/m³, 6.2%, and 15.3%, respectively. Increased bamboo content consistently improved mechanical performance and reduced WA, validating the ratio of 75:12.5:12.5 mix as a sustainable, high-performance alternative for particleboard manufacturing.

Apart from that, the properties of single-layer particleboard made from durian husk were investigated (Tang and Nguyen, 2025). The ratio of durian-to-bamboo (0–100%) with 10% urea formaldehyde resin and hot pressing at 150 °C under 2.5 MPa for 8 minutes was applied to create 12 mm boards targeting 0.70 g/cm³ density. In their study, the optimum board, which comprised of 50% durian husk and 50% bamboo, achieved a density of 0.68 g/cm³, MOR of

18.5 MPa, MOE of 2500 MPa, and IB of 0.32 MPa, meeting JIS A 5908 Type 8 standards. The value of TS was 10.5%, and WA was 25% after 24 hours, indicating that both were within acceptable limits. These findings suggest that balanced blends of durian husk and bamboo waste can produce particleboards with mechanical and physical properties comparable to conventional wood-based panels.

From observation, single-layer bamboo particleboard focuses on eco-friendly adhesives and material blending. Boards made with plant oil-based, formaldehyde-free adhesives showed comparable strength to commercial UF types. Previous research has successfully addressed the issue of reducing formaldehyde emissions using formaldehyde-free resins. (Zhang et al. 2024; Wu et al. 2022; Ge et al. 2020). There are few studies on the formaldehyde emission of conventional bamboo-based particle composites. However, Si et al (2022) produced bamboo particleboard at different levels of carbonization, whereas the deepening of carbonization increases the formaldehyde emissions of bamboo particleboard. In their study, formaldehyde emissions of original bamboo particleboard (OBP), light carbon bamboo particleboard (LBP) and deep carbon bamboo particleboard (DBP) were 1.9 mg/100 g, 2.8 mg/100 g and 5.0 mg/100 g, respectively, which were lower than the limit value (9 mg/100 g) of the standard (GB/T 18580–2001) for particleboard that can be used directly for indoor use. Beyond enhancing physical and mechanical properties, this approach eases concerns regarding harmful formaldehyde-based volatile organic compound (VOC) emissions, thereby ensuring better indoor air quality, particularly particleboard in furniture applications. Optimal performance, including better screw-holding and strength values, resulted from using MUF resin or coarser bamboo particles. Hybrid boards combining bamboo with coffee husk or durian waste also achieved high mechanical properties and fulfilled the standards, particularly the JIS standard.

Researchers face several challenges in the production of bamboo particle composites. Even though the mechanical properties of bamboo particleboards can meet international standards for wood particleboards, bamboo particleboards often suffer from poor water resistance due to the numerous hydrophilic groups of bamboo and the porous structure of the boards (Azadeh & Ghavami, 2018). Thus, there are a few methods to overcome this issue, such as alkaline treatment and carbonization. Carbonization is an environmentally friendly treatment method for lignocellulosic materials, including bamboo. This method can be done by exposing the materials at temperatures exceeding 160 °C and is widely employed in the modification of wood-based materials (Si et al. 2025; Piernik et al. 2022; Ratnasingam & Ioras, 2012), which can enhance their durability and moisture resistance but sometimes give a darker appearance on the samples. In addition, bamboo, which has a slightly higher density than wood, is also more difficult to process. Therefore, the processing of bamboo also differs from the conventional wood mills, thus requiring additional equipment or equipment modifications (Fahim et al., 2022). Based on Chilton et al., (2025), three constraints that need to be comprehensively addressed for bamboo to be widely adopted are (1) an extremely small and disbursed raw material feed stock with no efficient harvesting technology, (2) low-yielding and cost-inefficient processing resulting in premium pricing relative to competitive building products, and (3) a sub-optimal product–market fit that prevents bamboo from expanding its applications to ultimately compete with steel.

4. Conclusion

- As a conclusion, sandwich particleboard and single layer particleboard made from bamboo can be used in interior applications, including furniture.

- The strength of these bamboo composites is differentiated by the species of bamboo, bamboo element, particle sizes, ratio of bamboo, configuration and resin parameters.
- From observation, the most significant effect is given by the types of resin used.
- While conventional bamboo composites demonstrate considerable promise in reducing environmental impact and promoting green materials development, further advancements in material treatment, fibre modification, and processing techniques are required to enhance their durability, consistency, and broader industrial adoption.

Acknowledgement

The authors thanks Universiti Tun Hussein Onn Malaysia for the University's support in the successful execution of this study.

Author Contributions

Juliana Abdul Halip: Conceptualization, Writing-original draft, **Mohd Nazrul bin Roslan:** Funding acquisition, **Azrin Hani Abdul Rashid:** Project administration, **Noor Aslinda Abu Seman;** Writing – editing, **Nurazwa Ahmad:** Visualization, **Ambigaipagan Nagasamy:** Resources.

Funding statement

This project was supported by MDR research project code Q729 from Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.

Conflict of interest statement

The authors declare no conflict of interest.

References

- Ahmad, Z., Upadhyay, A., Ding, Y., Emamverdian, A., and Shahzad, A., (2021). Bamboo: Origin, habitat, distributions and global prospective. In *Biotechnological Advances in Bamboo: The “Green Gold” on the Earth* (pp. 1-31). Singapore: Springer Singapore.
- Azadeh, A., and Ghavami, K., (2018). The influence of heat on shrinkage and water absorption of *Dendrocalamus giganteus* bamboo as a functionally graded material, *Construction and Building Materials*, 186, 145-154, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.07.011](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.011)
- Bahari, S. A., Abu, F., Zakaria, M. N., Osman, S., and Appiah-Kubi, E., (2021). Feasibility of using low resin content levels in the production of bamboo particle composite: basic properties. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 922 (1), 012005, IOP Publishing, DOI: [10.1088/1755-1315/922/1/012005](https://doi.org/10.1088/1755-1315/922/1/012005)
- Barbirato, G. H. A., (2022). *Sandwich panel of oriented particles with unconventional and waste materials* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo)
- Bazzetto, J. T. D. L., Bortoletto, G., and Brito, F. M. S., (2019). Effect of particle size on bamboo particle board properties. *Floresta e ambiente*, 26(2), e20170125. DOI: [10.1590/2179-8087.012517](https://doi.org/10.1590/2179-8087.012517)
- Chilton, K., Kadivar, M., and Hinkle, H., (2025). From problems to possibilities: overcoming commercialization challenges to scale timber bamboo in buildings, *Sustainability*, 17(4), 1575, DOI: [10.3390/su17041575](https://doi.org/10.3390/su17041575)

- Fahim, M., Haris, M., Khan, W., and Zaman, S., (2022). Bamboo as a construction material: prospects and challenges. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(3), DOI: [10.12913/22998624/149737](https://doi.org/10.12913/22998624/149737)
- Gauss, C., Araujo, V. D., Gava, M., Cortez-Barbosa, J., and Savastano Junior, H., (2019). Bamboo particleboards: recent developments, *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 49, e55081. DOI: [10.1590/1983-40632019v4955081](https://doi.org/10.1590/1983-40632019v4955081)
- Ge, S., Ma, N. L., Jiang, S., Ok, Y. S., Lam, S. S., Li, C., ... and Sonne, C., (2020). Processed bamboo as a novel formaldehyde-free high-performance furniture biocomposite, *ACS applied materials & interfaces*, 12(27), 30824-30832, DOI: [10.1021/acsami.0c07448?goto=supporting-info](https://doi.org/10.1021/acsami.0c07448?goto=supporting-info)
- Gholizadeh, P., Hosseinabadi, H. Z., Hebel, D. E., and Javadian, A., (2023). Investigation of mechanical, physical and thermoacoustic properties of a novel light-weight dense wall panels made of bamboo *Phyllostachys Bambusides*, *Scientific Reports*, 13(1), 18396., [10.1038/s41598-023-45412-3](https://doi.org/10.1038/s41598-023-45412-3)
- Huang, Y., Jiang, Z., and Zhang, L., (2015). Bamboo as a reinforcement in composite materials, *Composites Part B: Engineering*, 69, 150–158
- Huaxu, Z., Hua, L. S., Tahir, P. M., Ashaari, Z., Al-Edrus, S. S. O., Ibrahim, N. A., ... and Mohamad, S. F., (2020). Physico-mechanical and biological durability of citric acid-bonded rubberwood particleboard. *Polymers*, 13(1), 98, DOI: [10.3390/polym13010098](https://doi.org/10.3390/polym13010098)
- Iswanto, A. H., and Ompusunggu, P. L. (2019, November). Sandwich Particleboard (SPb): Effect of particle length on the quality of board. In IOP conference series: earth and environmental science (Vol. 374, No. 1, p. 012002). IOP Publishing, DOI: [10.1088/1755-1315/374/1/012002](https://doi.org/10.1088/1755-1315/374/1/012002)
- Iswanto, A. H., Aritonang, W., Azhar, I., Supriyanto, and Fatriasari, W., (2017). The physical, mechanical and durability properties of sorghum bagasse particleboard by layering surface treatment. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 14(1), 1-8.
- Iswanto, A. H., Hakim, A. R., Azhar, I., Wirjosentono, B., and Prabuningrum, D. S., (2020). The physical, mechanical, and sound absorption properties of sandwich particleboard (SPb). *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 48(1), 32-40.
- Iswanto, A. H., Madyaratri, E. W., Hutabarat, N. S., Zunaedi, E. R., Darwis, A., Hidayat, W., ... and Hua, L. S., (2022). Chemical, physical, and mechanical properties of Belangke bamboo (*Gigantochloa pruriens*) and its application as a reinforcing material in particleboard manufacturing. *Polymers*, 14(15), 3111, DOI: [10.3390/polym14153111](https://doi.org/10.3390/polym14153111)
- Iswanto, A. H., Nadeak, M. R., Octaviani, F., Darwis, A., Susilowati, A., and Hartono, R., (2021, November). The influence of particle soaking in acetic acid and NaOH solutions on the quality of sandwich particleboard from raru wood and belangke bamboo. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 886(1), 012015, IOP Publishing, DOI: [10.1088/1755-1315/886/1/012015](https://doi.org/10.1088/1755-1315/886/1/012015)
- Jing, G., Zhang, R., Ngamkhanong, C., and Tavakol, M., (2025). Mechanical performance and dynamic characteristics of a novel bamboo-plywood composite railway sleeper, *Construction and Building Materials*, 476, 141264, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2025.141264](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141264)

- Krug, D., Direske, M., Tobisch, S., Weber, A., and Wenderdel, C., (2023). *Particle-based materials*. In *Springer handbook of wood science and technology* (pp. 1409-1490). Cham: Springer International Publishing.
- Legesse, A. A., Gebremeskel, S. A., Paramasivam, V., and Selvaraj, S. K., (2021). Development and characterization of bamboo-sesame stalk hybrid urea-formaldehyde matrix composite for particleboard application, *Materials Today: Proceedings*, 46, 7351-7358. DOI: [10.1016/j.matpr.2020.12.1026](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1026)
- Li, X., Wang, J., and Zhang, H., (2019). Mechanical properties and durability of bamboo particleboard: a review', *BioResources*, 14(2), 431–446
- Liu, X., Deng, J., Wang, M., Meng, X., and Xu, L., (2025). Edgewise compressive properties of ecological sandwich panels with engineered bamboo face sheets and bamboo culm core. *Materials*, 18(9), 2158, DOI: [10.3390/ma18092158](https://doi.org/10.3390/ma18092158)
- Martijanti, M., Sutarno, S., and Juwono, A. L., (2021). Polymer composite fabrication reinforced with bamboo fiber for particle board product raw material application. *Polymers*, 13(24), 4377, DOI: [10.3390/polym13244377](https://doi.org/10.3390/polym13244377)
- Mousavi, S. R., Zamani, M. H., Estaji, S., Tayouri, M. I., Arjmand, M., Jafari, S. H., ... and Khonakdar, H. A., (2022). Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: a review of recent case studies. *Journal of Materials Science*, 57(5), 3143-3167, DOI: [10.1007/s10853-021-06854-6](https://doi.org/10.1007/s10853-021-06854-6)
- Muche, B. A., and Gebremedhen, H. S., (2024). Experimental investigation on the mechanical and physical properties of particleboard from residual materials with lowland bamboo chip composition, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2024(1), 8396809, DOI: [10.1155/amse/8396809](https://doi.org/10.1155/amse/8396809)
- Nair, K. P., (2020). Rubber (*Hevea brasiliensis*). In *Tree Crops: Harvesting Cash from the World's Important Cash Crops* (pp. 287-332). Cham: Springer International Publishing.
- Nayak, A., Bajaj, A. S., Jain, A., Khandelwal, A., and Tiwari, H., (2013). Replacement of steel by bamboo reinforcement, *IOSR journal of mechanical and civil engineering*, 8(1), 50-61
- Owodunni, A. A., Lamaming, J., Hashim, R., Taiwo, O. F. A., Hussin, M. H., Mohamad Kassim, M. H., ... and Hiziroglu, S., (2020). Adhesive application on particleboard from natural fibers: A review, *Polymer Composites*, 41(11), 4448-4460, DOI: [10.1002/pc.25749](https://doi.org/10.1002/pc.25749)
- Piernik, M., Woźniak, M., Pinkowski, G., Szentner, K., Ratajczak, I., and Krauss, A., (2022). Impact of the heat treatment duration on color and selected mechanical and chemical properties of scots pine wood, *Materials*, 15(15), 5425, DOI: [10.3390/ma15155425](https://doi.org/10.3390/ma15155425)
- Ratnasingam, J., and Ioras, F., (2012). Effect of heat treatment on the machining and other properties of rubberwood, *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(5), 759-761
- Santhosh, N., Praveena, B. A., Srikanth, H. V., Angadi, S., Gunge, A., Rudra Naik, M., ... and Ravichandran, G., (2022). Experimental investigations on static, dynamic, and morphological characteristics of bamboo fiber-reinforced polyester composites, *International Journal of Polymer Science*, 2022(1), 1916877, DOI: [10.1155/2022/1916877](https://doi.org/10.1155/2022/1916877)
- Si, S., Zheng, X., Zhou, C., Zou, D., and Li, X., (2025). Enhancing the water resistance properties of bamboo particleboard by reconstructing lignocellulose through carbonization

- treatment, *International Journal of Biological Macromolecules*, 286, 138385, DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2024.138385](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138385)
- Stark, N., and Cai, Z., (2021). *Wood-based composite materials: panel products*, glued laminated timber, structural composite lumber, and wood–nonwood composites, Chapter 11 in FPL-GTR-282, 11-1. U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory
- Suwan, A., Sukhawipat, N., Uthaipan, N., Saetung, A., and Saetung, N., (2020). Some properties of experimental particleboard manufactured from waste bamboo using modified recycled palm oil as adhesive, *Progress in Organic Coatings*, 149, 105899, DOI: [10.1016/j.porgcoat.2020.105899](https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105899)
- Tan, W., Hao, X., Fan, Q., Sun, L., Xu, J., Wang, Q., and Ou, R., (2019). Bamboo particle reinforced polypropylene composites made from different fractions of bamboo culm: Fiber characterization and analysis of composite properties, *Polymer Composites*, 40(12), 4619-4628, DOI: [10.1002/pc.25329](https://doi.org/10.1002/pc.25329)
- Tang, T. K. H., and Nguyen, N. Q., (2025). Investigation of particleboard production from durian husk and bamboo waste, *Journal of Composites Science*, 9(6), 276, [10.3390/jcs9060276](https://doi.org/10.3390/jcs9060276)
- Wu, Z., Aladejana, J. T., Liu, S., Gong, X., Wang, X. A., and Xie, Y., (2022). Unsaturated polyester resin as a nonformaldehyde adhesive used in bamboo particle boards, *ACS omega*, 7(4), 3483-3490, DOI: [10.1021/acsomega.1c05969](https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05969)
- Yang, F., Fei, B., Wu, Z., Peng, L., and Yu, Y., (2014). Selected properties of corrugated particleboards made from bamboo waste (*Phyllostachys edulis*) laminated with medium-density fiberboard panels, *BioResources*, 9(1), 1085-1096,
- Yu, H., Wu, J., Gao, Y., Lu, Z., and Hu, W., (2024). Research progress on bamboo fiber reinforced polymeric composites: Processes, properties, and future directions, *Polymer Composites*, 45(11), 9629-9646. DOI: [10.1002/pc.28436](https://doi.org/10.1002/pc.28436)
- Zhang, L., Chen, Y., Geng, S., Huang, Z., Qiu, R., Chen, T., and Liu, W., (2024). Development of plant oil-based adhesives for formaldehyde-free bamboo particleboards, *Industrial Crops and Products*, 210, 118146, DOI: [10.1016/j.indcrop.2024.118146](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118146)
- Zhao, W., Zhang, W., Zhang, J., Yuan, S., and Chen, H., (2023). Effect of bamboo particle blending system on the properties of its composites, *Polymer Composites*, 44(6), 3301-3312, DOI: [10.1002/pc.27322](https://doi.org/10.1002/pc.27322)