

Orman Endüstri Mühendisliğinde Malzeme Bilimi ve Teknolojik Gelişmeler

Editör
HUREM DUTAL



BİDGE Yayınları

**Orman Endüstri Mühendisliğinde Malzeme Bilimi ve
Teknolojik Gelişmeler**

Editör: HUREM DUTAL

ISBN: 978-625-372-985-1

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Orman Endüstri Mühendisliği doğal kaynakların etkin, verimli ve sürdürülebilir biçimde değerlendirilmesini hedefleyen çok disiplinli bir mühendislik alanıdır. Günümüzde artan çevresel kaygılar, enerji verimliliği, karbon salınımının azaltılması ve yenilenebilir kaynakların ön plana çıkması, ahşap ve ahşap esaslı malzemelerin yeniden önem kazanmasına yol açmıştır. Bu bağlamda, malzeme bilimi alanındaki yenilikler ve teknolojik gelişmeler, hem ürün kalitesinin artırılması hem de çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından kritik rol oynamaktadır.

Elinizdeki bu kitap, “Orman Endüstri Mühendisliğinde Malzeme Bilimi ve Teknolojik Gelişmeler” başlığı altında, alana yönelik güncel bilimsel yaklaşımları ve araştırma sonuçlarını bir araya getirmektedir. Kitapta yer alan bölümler; kaplama esaslı mühendislik ürünlerinden odun-plastik kompozitlere, ısıtma işlem uygulamalarından karbon nanotüplerin lignoselülozik malzemelerde kullanımına kadar geniş bir yelpazede yenilikçi konuları kapsamaktadır.

Bu kitabın, Orman Endüstri Mühendisliği alanında çalışan araştırmacılar, akademisyenler, öğrenciler ve sektör paydaşları için güncel bir başvuru kaynağı oluşturacağına inanıyoruz. Ayrıca, sürdürülebilir malzeme teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanmasına yönelik çalışmalara ilham vermesi en büyük temennimizdir.

Katkı sunan tüm yazarlarımıza, değerlendirme sürecinde emeği geçen ve destek veren tüm paydaşlara teşekkür eder; bu eserin ilgili literatüre değerli katkılar sunmasını dilerim.

EDİTÖR

Doç. Dr. Hurem DUTAL

Aralık 2025

İÇİNDEKİLER

KAPLAMA ESASLI MÜHENDİSLİK ÜRÜNÜ AĞAÇ MALZEMELER VE YAPI SEKTÖRÜNDEKİ KULLANIMLARI	1
<i>İLKAY ATAR</i>	
ODUN–PLASTİK KOMPOZİT MALZEME BİLİMİ	27
<i>İLKAY ATAR, FATİH MENGELOĞLU</i>	
AHŞAPTA ISIL İŞLEM UYGULAMALARI VE MALZEME ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ: GÜNCEL BİR BAKIŞ	59
<i>MUSTAFA ÖNCEL, ALPEREN KAYMAKCI</i>	
YAPI ENDÜSTRİSİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR YENİLİK: ÇAPRAZ LAMİNASYONLU AHŞAP (CLT) PANELLER	92
<i>MUSTAFA ÖNCEL, ALPEREN KAYMAKCI</i>	
BOR KATKILI YONGALEVHALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YANIT YÜZEY METODOLOJİSİ İLE OPTİMİZASYONU	117
<i>MUHAMMED ZAKİR TUFAN</i>	
KARBON NANOTÜPLERİN LİGNOSELÜLOZİK KOMPOZİT MALZEMESİNDE KULLANIMI	137
<i>MUHAMMED ZAKİR TUFAN, BİROL ÜNER</i>	
EĞİTİM – ÖĞRETİMDE GELECEĞE YÖNELİK BEKLENTİLERİN ARAŞTIRILMASI (DÜZCE ÜNİVERSİTESİ ORMANCILIK MESLEK YÜKSEKOKULU)	160
<i>MUHAMMET ÇİL</i>	
İMALAT SEKTÖRÜNDE ÇALIŞANLARIN İŞ TATMİNİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER (DÜZCE İLİ ÖRNEĞİ)	173
<i>MUHAMMET ÇİL</i>	
ORMAN ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİNDE YAŞLI TÜKETİCİLERE YÖNELİK YARATICI ÜRÜN TASARIMI ..	188
<i>AHMET BORA KIRKLIKÇI, SERAP BAYRAM</i>	

POLİSTİREN KOMPOZİT KONTRPLAKLARIN BOYUTSAL KARARLILIK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ	207
--	-----

ABDULLAH UĞUR BİRİNCİ, HASAN ÖZTÜRK, AYDIN DEMİR

MDF PANELLERİN CNC İLE İŞLENMESİNDE ENERJİ TÜKETİMİ VE MALİYET ANALİZİ	234
---	-----

ABDULLAH UĞUR BİRİNCİ, AYDIN DEMİR, HASAN ÖZTÜRK

BÖLÜM 1

KAPLAMA ESASLI MÜHENDİSLİK ÜRÜNÜ AĞAÇ MALZEMELER VE YAPI SEKTÖRÜNDEKİ KULLANIMLARI

İlkay ATAR¹

Giriş

Nüfus artışının önemli ölçüde yükselmesi ve konut standartlarının iyileşmesi nedeniyle yapısal ahşap ürünlere duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır (Thelandersson ve Larsen, 2003). Aynı zamanda kereste endüstrisi, tomruk talebinin artması ve büyük çaplı, yaşlı ağaçların bulunabilirliğinin azalması nedeniyle doğal kaynakların korunmasını sağlayacak çözümler geliştirmek zorundadır (Bodig ve Jayne, 1993; Forest Products Laboratory, 2010). Önceden büyük kütüklerden biçilerek elde edilen yapısal keresteler, günümüzde farklı şekil ve boyutlarda yeniden yapılandırılmış ahşap malzemelerden üretilmekte olup, bu malzemeler mühendislik ürünü ağaç malzemeler (MAM) olarak sınıflandırılmaktadır. MAM'lar, geleneksel keresteye kıyasla ahşap kullanımını en üst düzeye çıkarabilir ve küçük çaplı kütüklerin değerlendirilmesine olanak tanır (Forest Products Laboratory, 2010;

¹ Doç. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9527-1791

Gong, 2019). Kullanılan hammadde türlerine göre kaplama tabanlı, yonga tabanlı, lif tabanlı ve kereste tabanlı olmak üzere çeşitli MAM türleri bulunmaktadır; bunlar arasında kaplama tabanlı grup en eski olanı olmakla birlikte, günümüzde de yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Kaplama tabanlı MAM'lar, bir diğer adıyla tabakalı ahşap kompozitler, kaplama levhalarının veya kaplama şeritlerinin bir yapıştırıcı ile birleştirilmesiyle üretilmektedir (Bodig ve Jayne, 1993). Bu ürünler başlıca kontrplak, tabakalı kaplama kereste (TKK) ve paralel şerit keresteyi (PŞK) içermektedir (Resim 1). Söz konusu ürünler çoğunlukla soyma yöntemiyle elde edilen tomruklardan ve yeniden yapılandırılmış ahşap malzemelerden üretilmekte olup, daha sonra mühendislik panelleri olarak bilinen büyük levhalar hâline getirilebilmektedir (Vogt ve Nauth, 2015). Kaplama kullanmanın, biçilmiş keresteye göre önemli avantajı; özellikle küçük çaplı tomruklardan elde edilen ahşap malzemelerde verimi artırabilmesidir (Ansell, 2015). Kaplama esaslı MAM'lar, masif keresteye kıyasla daha homojen bir yapıya ve daha uniform mekanik özelliklere sahiptir; bu da onları yapı sektöründe yapı malzemesi olarak uygun bir aday hâline getirmektedir.

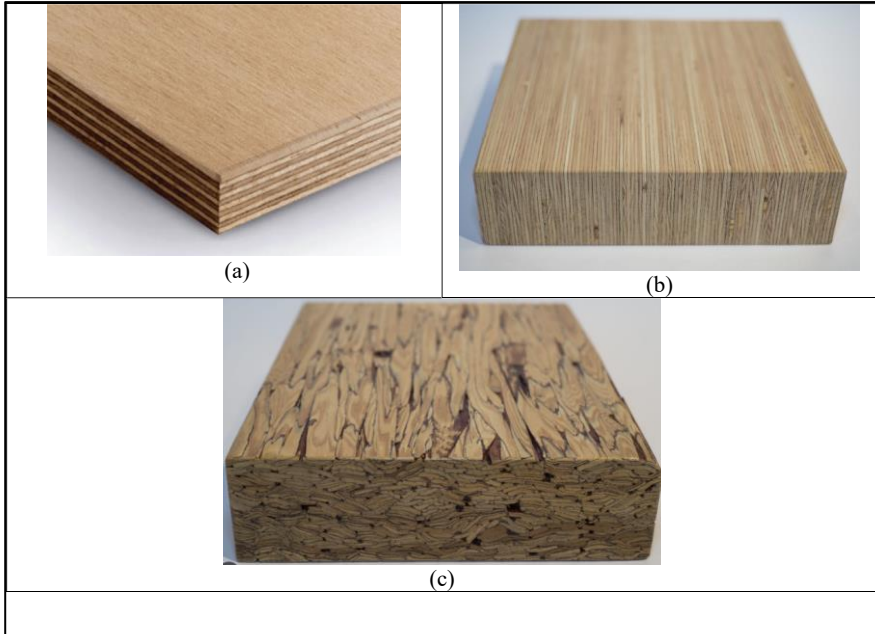
Kaplama esaslı MAM'lar; kullanılan ağaç türü, yapıştırıcı tipi ve tabaka yerleşim düzenine göre birbirinden farklılık gösterir. Resim 2, yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan dört ahşap ürününün—masif ahşap/kereste, kontrplak, TKK ve PŞK—kesitlerini (yani genişlik–kalınlık düzlemi veya burada x-y düzlemi olarak adlandırılan bölüm) göstermektedir.

Y-ekseni boyunca boyutsal değişim, masif ahşap, kontrplak ve TKK'de birbirine benzer olup, bunun nedeni bu doğrultuda (yani ahşabın radyal doğrultusunda) yapıştırıcı bağlarının etkisinin sınırlı olmasıdır. Buna karşın, PŞK'nin y-ekseni yönündeki boyutsal değişimi diğer üç üründen daha küçüktür; bunun sebebi, x-y

düzlemindeki kaplama şeritlerinin düzensiz yerleşimi ve yapıştırıcının uygulanmasıdır.

X-ekseni boyunca boyutsal değişim ise masif ahşapta en büyük (Not: x-ekseni ahşabın teğet yönüdür), kontrplak ve PŞK'de en küçük, TKK'de ise orta düzeydedir. Başka bir deyişle, masif ahşap hem x- hem de y-eksenlerinde en yüksek değişkenliğe sahiptir; kontrplak ve TKK x-ekseni boyunca daha düşük değişkenlik gösterir; PŞK ise hem x- hem de y-eksenlerinde en düşük değişkenliğe sahiptir.

Resim 1 (a) Kontrplak, (b) tabakalı kaplama kereste, (c) paralel şerit kereste



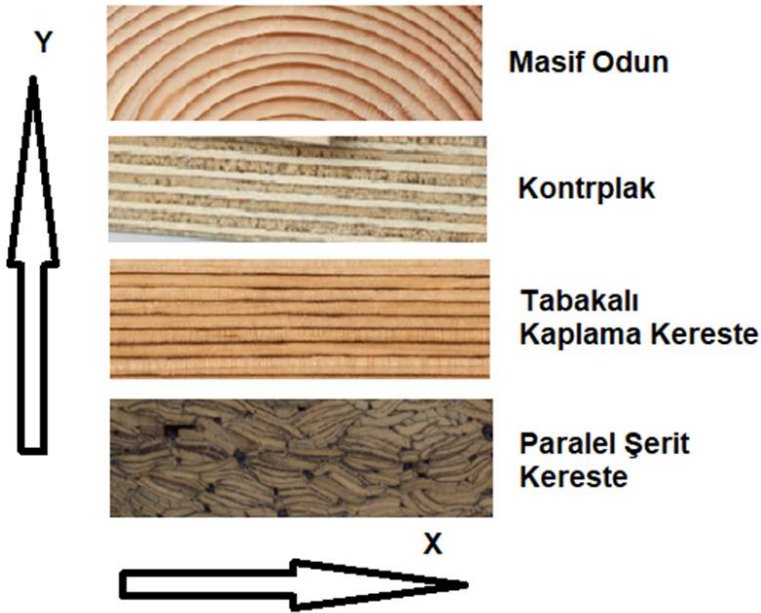
Kaynak : İlkay ATAR

Kaplama esaslı MAM'ların ilk icat edilen türü kontrplaktır (Porteous ve Kermani, 2013). Daha sonra, kaplama yerleşim düzenlerinde yapılan değişiklikler TKK'nin geliştirilmesini sağlamış, ardından uzun kaplama şeritlerinin kullanılmasıyla PŞK

üretiştir. Günümüzde kaplama esaslı MAM'lar yapı sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Ansell, 2015).

Kontrplak genellikle duvar, döşeme ve çatı kaplaması olarak ve I-kirişlerde gövde elemanı olarak kullanılmaktadır. TKK çoğunlukla kiriş, kolon ve I-kirişlerde başlık elemanı olarak tercih edilmektedir. PŞK ise ağırlıklı olarak kolon ve kiriş uygulamalarında kullanılmaktadır.

Resim 2 Masif ve MAM'ların enine kesitleri



Kaynak: İlkay ATAR

Kontrplak

Kontrplak, çoğu durumda bitişik tabakalardaki ahşap liflerinin birbirine dik (90°) olacak şekilde yerleştirildiği, birden fazla ince kaplama tabakasının yapıştırılmasıyla oluşan bir ahşap paneldir. Genellikle bir kontrplak levha tek sayıda kaplama tabakasından oluşur (Bodig ve Jayne, 1993; Forest Products

Laboratory, 2010; Natural Resources Canada, 2014). Her tabaka ply olarak adlandırıldığı için kontrplak, bir tür “ahşap sandviç” olarak değerlendirilebilir (Vogt ve Nauth, 2015). Kontrplakta bitişik tabakaların çapraz lamine edilmesi, hem uzunluk hem de genişlik yönlerinde mekanik özelliklerin ve boyutsal stabilitenin iyileşmesine katkı sağlar (Natural Resources Canada, 2014).

Kontrplak, kaplama esaslı MAM’ların en eski türlerinden biridir. Yaklaşık 3500 yıl önce, Mısır’da üçüncü Mısır hanedanlığı dönemine tarihlenen bir tabutun parçası olarak kontrplak benzeri bir yapı tespit edilmiştir (Ansell, 2015). Daha sonra, MÖ 1500 civarına ait bazı tasvirlerde, işçilerin balta benzeri bir aletle kontrplak kestiği görülmüştür. Bu tasvirlerde ayrıca muhtemelen hayvansal kökenli olan bir yapıştırıcının ateş üzerindeki bir kapta hazırlandığı da gösterilmektedir (ThinkWood CEU, 2021). Kontrplağın ortaya çıkışı, ahşabın yüksek maliyeti ile ilişkilendirilmiştir. Ahşap arzının yetersizliği nedeniyle Mısırlılar, Doğu Afrika’dan abanoz ve maun; Lübnan’dan sedir ve çam gibi ağaç türlerini deniz yoluyla çok yüksek maliyetlerle ithal etmek zorunda kalmışlardır (Filippovich, 2018). Daha sonra, antik Yunanlılar ve Romalılar da kontrplak üretimine başlamışlardır. Bu dönemde kontrplak ağırlıklı olarak mobilya ve ev eşyalarının yapımında kullanılmıştır (Sellers, 1985). Kontrplak üretimi, 1850’li yıllarda İsveçli mucit Emmanuel Nobel’in döner torna (rotary lathe) modelini geliştirmesiyle büyük bir ivme kazanmıştır (Ansell, 2015). Bu model, ahşap bir bloktan belirli ve sabit kalınlıkta kaplama elde edilmesine olanak sağlamış; böylece kontrplak levhalarının uniform kalınlık ve yapıya sahip olması mümkün olmuştur (Ansell, 2015).

Her ne kadar kontrplak günümüzde konut ve ticari yapılarda kaplama malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılsa da erken dönem inşaatçılar yeni ortaya çıkan bu kontrplak panelleri kullanmak konusunda isteksizdi. Bunun nedeni, kullanılan kan ve soya fasulyesi proteini esaslı yapıştırıcıların suya dayanıklı olmaması ve

panellerin ıslanınca katman ayrılması (delaminasyon) göstermesiydi (Smulski, 1997). 1934 yılında, suya dayanıklı sentetik ahşap yapıştırıcılarının geliştirilmesi bu sorunu çözdü ve inşaatçıların endişelerini giderdi (Ansell, 2015; Smulski, 1997).

II. Dünya Savaşı sırasında kontrplak, tekneler, uçaklar, sandıklar, mühimmat kutuları ve binalar gibi birçok endüstride yoğun şekilde kullanılmaya başladı (Smulski, 1997). Bu durum, savaş sonrası dönemde kontrplak üretiminde ciddi bir artışa yol açtı (Ansell, 2015) ve kontrplak hem yapısal hem de dış cephe uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Kontrplağın kullanımına dair dikkat çekici örneklerden biri, II. Dünya Savaşı döneminde geliştirilen efsanevi Mosquito bombardıman uçağıdır (Canadian Wood Council, 2021). Uçağın yapımında ladin ağacı, huş kontrplak ve balsa ağacı kullanılmış; böylece düşük ağırlıkla gerekli yapısal dayanım elde edilmiştir (McIntyre, 1944).

Kontrplak ve diğer yapısal paneller, hafif ahşap karkaslı ev ve bina inşaat yöntemlerini köklü biçimde değiştirmiştir (Sellers, 1985; Bowyer ve ark., 2007). Geçtiğimiz yüzyılın ortalarından itibaren, yapısal panellerin kullanımı birkaç özel uygulamadan genişleyerek zemin altı kaplaması (subflooring), çatı ve duvar kaplaması, köşe çaprazlama elemanları ve beton kalıp panelleri gibi yaygın yapı malzemelerine dönüşmüştür (Bowyer ve ark., 2007).

Başlangıçta Amerika Birleşik Devletleri'nin Pasifik Kuzeybatısı bölgesinde yoğunlaşan kontrplak endüstrisi, ağırlıklı olarak büyük çaplı yaşlı Douglas-göknarı kullanmaktaydı. Ancak 1970'lerde, güney sarıçamı kaplamalarının yapıştırılmasındaki teknolojik engellerin aşılmasıyla üretim güneydoğu bölgesine doğru genişledi (Smulski, 1997).

Kontrplak Üretimi

Özel olarak seçilmiş tomruklar, kabuk soyucu makineye taşınır. Bu makinede tomruklar bir çelik pençeye karşı döndürülerek

kabukları uzaklaştırılır (Canadian Wood Council, 1997). Daha sonra kabuğu soyulan tomruklar, boyuna yönde kesilerek ebatlanır. Her tomruk, keskin bir bıçağa karşı dönen büyük bir tornaya yerleştirilir. Tomruk döndükçe, ahşaptan sürekli ve ince bir tabaka—yani kaplama—tıpkı bir rulodan kâğıdın açılması gibi yüzeyden soyularak elde edilir.

Tüm tomruk, kaliteli ve yüksek verim elde etmek amacıyla mümkün olduğunca tam olarak kullanılmaya çalışılır. Geriye kalan küçük silindirik parçaları ise diğer ahşap ürünlerinin üretiminde değerlendirilir. Soyulan uzun şerit halindeki kaplama, daha sonra makaslarla istenen genişliklerde kesilir ve sınıflandırılır. Kaplamanın kusurlu bölümlerinin çıkarılması da mümkündür. Ardından kaplama, buhar veya gazla ısıtılan fırınlarda yaklaşık %5 nem içeriğine kadar kurutulur (Canadian Wood Council, 1997). Kullanım amacına bağlı olarak kaplama kalınlığı 0,3 mm ile 6,3 arasında değişebilir (Sellers, 1985). Kurutma ve sınıflandırma işlemlerinden sonra kaplamalar, düzgün kalınlıkta yapıştırıcı tabakası uygulayan tutkallama makinesinden geçirilir. Kontrplakların yapısal ve dış mekân uygulamalarında, yani hava koşullarına maruz kalacağı durumlarda genellikle fenol-formaldehit (FF) esaslı yapıştırıcılar kullanılmaktadır (Forest Products Laboratory, 2010). Kaplama “sandviçleri” daha sonra üretim sürecinin kilit aşamalarından biri olan sıcak prese gönderilir. Bu aşamada yapıştırıcının kürlenmesi için levhalar yaklaşık 150°C sıcaklığa ve 1,38 MPa basınca tabi tutulur. Presleme işleminden sonra paneller istenen boyutlarda kesilir, zımparalanır ve kalite sınıflandırmasına tabi tutulur (Canadian Wood Council, 1997).

Mobilya, dolap ve iç mekân dekorasyonu gibi yapısal olmayan kullanım amaçları için üretilen kontrplaklarda, suya dayanıklı üre-formaldehit (UF) esaslı yapıştırıcılar kullanılmaktadır. UF yapıştırıcılar, sıcak presleme sırasında yaklaşık 120°C sıcaklıkta kürlenebilmektedir. Ayrıca, sıcak presleme süresini azaltmak ve

Üretim verimliliğini artırmak amacıyla yüksek frekanslı ısıtma sistemi ile de krlenmeleri mümkündür (Forest Products Laboratory, 2010).

Kontrplak eşitleri ve Boyutları

Plywood, çok çeşitli ağaç türlerinden retilibilmekle birlikte, özellikle Kuzey Amerika’da iğne yapraklı ağaç türleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda Douglas kknarı, batı hemlok, ladin türleri, amlar ve kknarlar kontrplak endüstrisinde sıklıkla kullanılan temel türlerdir (Canadian Wood Council, 2021). Bu türler, kontrplak yapısı içinde sahip oldukları dayanım özellikleri ve kullanım amaçlarına göre farklı kategorilere ayrılmaktadır.

Yapraklı ağaç türleri arasında, kaplama üretiminde en yaygın kullanılanlar kayın, kızılağaç, ıhlamur ve lauana (genellikle “Filipin maunu” olarak bilinir) türleridir (Vogt ve Nauth, 2015; Natural Resources Canada, 2014). Bu türlerde belirgin ilkbahar odunu–yaz odunu zonları bulunmadığından, yoğunlukları ve yapısal özellikleri oldukça homojendir. Bu durum, soyma işlemine kolaylaştırmakta ve ince, düzgün ve dayanıklı kaplamaların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, estetik damarlı yapraklı odun türleri çeşitli şekillerde bir araya getirilerek dekoratif amaçlı kullanılan benzersiz yüzey desenleri oluşturulmaktadır (Vogt ve Nauth, 2015).

İlk standart kontrplak levha, 1.22 m genişliğinde ve 2.44 m uzunluğunda olup 1928 yılında ortaya çıkmıştır (Wikipedia, 2021). O tarihten bu yana kontrplak levhalar için bu standart boyut neredeyse hiç değişmemiştir. Kontrplakların yaygın kalınlığı 3.2 mm ile 76 mm arasında değişmektedir (Natural Resources Canada, 2014). Bu kalınlık, kullanılan kaplama tabakalarının kalınlığına ve katman sayısına bağlıdır. En yaygın kontrplaklar 3, 5 veya çoklu katmanlara sahiptir. Üç katmanlı kontrplak yaklaşık 2–3 mm kalınlığında olup, çap altı kaplama gibi alt zemin ile seramik arasındaki ara tabaka olarak kullanılabilir. Dekoratif yapraklı

ağaç kontrplakları, çoğunlukla düzgün damar dokusuna göre seçilir ve geniş ölçüde iç mekânda kullanılır. Yaygın kullanım alanına sahip dekoratif yapraklı kontrplak genellikle beş katmanlıdır ve yaklaşık 4 mm kalınlığa sahiptir; iç ve dış mekânda çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Yedi katmandan fazla tabaka içeren çok katmanlı kontrplaklar ise kalın kontrplak olarak sınıflandırılır ve özellikle yük taşıyan koşullarda yeterli dayanım ve dayanıklılık gerektiren yapısal uygulamalarda yaygın şekilde kullanılır (Sellers, 1985). Kalın kontrplaklar, yeni yapılan saçak veya çatı sistemlerinde taşıyıcı elemanlara bağlanan alt zemin veya yapısal kaplama olarak gereklidir.

Mobilya, dolap ve iç mekân dekorasyonu için kullanılan dekoratif kaplama üretiminde yapraklı ağaçlar soyularak veya dilimlenerek işlenebilir. Dilimleme yöntemi, daha fazla hammadde kaybına ve daha yoğun işçiliğe neden olur (Bowyer ve ark., 2007). Huş gibi yapraklı ağaç kaplamaları genellikle 1.5 mm kalınlığındadır. Buna karşılık, kontrplak ve TKK üretiminde kullanılan iğne yapraklı ağaç kaplamaları çoğunlukla 3 mm kalınlığında kesilir (Ansell, 2015).

Kontrplağın Özellikleri

Kontrplak yoğunluğu, kullanılan ağaç türüne ve kalınlığa bağlı olarak değişir ve genellikle 400 kg/m^3 ile 800 kg/m^3 arasında değişmektedir (Forest Products Laboratory, 2010). Bu değer, fırın kurusu odun yoğunluğu ile karşılaştırıldığında yaklaşık 320 kg/m^3 ile 720 kg/m^3 arasında değişmektedir (Forest Products Laboratory, 2010). Kontrplak, iyi işlenebilirlik özelliklerine sahiptir; bu nedenle biçme (kesim), çakma (birleştirme) ve yapıştırma gibi işlemler, normal odunla çalışıldığı gibi rahatlıkla yapılabilir. Ancak kontrplakta kullanılan çapraz tabaka tasarımı, lif yönünde kırılabilen normal odunun aksine, panellerin lif yönünde kolayca çatlamasını

engeller. Sonuç olarak, kontrplak panellerin kenar yakınlarında vida ve çivi kullanmak yapısal uygulamalarda mümkündür.

Kontrplak, burkulma, bükülme veya deformasyona karşı olağanüstü yerleşik direnç gösterir; bu özellik, özellikle güçlü rüzgarlar veya depremler nedeniyle oluşan büyük kesme gerilmelerinin aktarılmasında önemlidir (Sellers, 1985). Kaplamadaki her ardışık odun tabakasının lif yönü 90 derece değiştirilerek birçok dayanım özelliği eşitlenir. Bu sayede kontrplak, iki yönlü taşıma kapasitesine sahip olur; yani genişlik yönündeki özellikler yaklaşık olarak uzunluk yönündeki özelliklerle eşitlenir. Örneğin, tipik bir çerçeveli duvarda (kapı ve pencereler dahil) kullanılan 6 mm kalınlığındaki kontrplak, çapraz yerleştirilmiş 19 mm kalınlığındaki tahtaların sağladığı rijitlik ve dayanımın iki katını sunar. Çerçeveye yapıştırıldığında, kontrplak duvarların dayanım değerleri daha da artar (Sellers, 1985).

Yapısal kontrplak, suya dayanıklı reçineler kullandığından, kenarları uygun şekilde mühürlendiğinde hava koşullarına dayanıklı bir panel elde edilebilir (Natural Resources Canada, 2014). Bir kontrplak panelin izin verilen tasarım değerlerinin bilinmesi, diyaframlar veya deprem dayanımlı kesme duvarları gibi özel mühendislik uygulamaları dışında genellikle gerekli değildir. Paneller, çerçeveye doğru aralıklarla düzgün bir şekilde sabitlendiğinde, yalnızca açıklık derecelendirmeleri, panellerin bina kodunda belirtilen çatı ve zemin yükleri altında iyi performans gösterebileceğini garanti eder.

Kontrplağın Kullanım Alanları

Kontrplak hem yapısal hem de yapısal olmayan uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olup (Forest Products Laboratory, 2010), hem nemli hem de kuru ortamlarda kullanılmak için ideal bir seçenek olarak değerlendirilebilir (Canadian Wood Council, 2021).

İnşaat sektöründe kontrplak, yük taşıyan eleman olarak özellikle platform çerçeve yapılarında, tek ve çok aileli konutlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır; örneğin kaplama ve alt döşeme uygulamalarında tercih edilir, çünkü iyi boyutsal kararlılığa sahiptir ve çatlamaz, kavislendirme veya bükülme yapmaz (Canadian Wood Council, 1997). Kontrplak paneller, duvar kaplama malzemesi olarak kullanılır; bu sayede kesme duvarlarına yüksek yanal dayanım sağlar, yüksek burkulma dayanımı kazandırır ve duvarların genel ısıl verimliliğinin sağlanmasına katkıda bulunur (Bowyer ve ark., 2007; Canadian Wood Council, 1997). Çatı kaplamaları da sıklıkla kontrplak ile yapılır; belirlenen çerçeveleme ve çakma desenleri kullanıldığında kontrplak panellerin rijitliği, diyafram etkisi oluşturur (Canadian Wood Council, 1997).

Bunun yanı sıra kontrplak, I-kirişlerin üretiminde gövde malzemesi, denizcilik uygulamaları, paletler, endüstriyel konteynerler ve mobilya üretimi gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Özel yüzey işlemi uygulanmış ekstra kalın kontrplak, beton yapılarda kalıp yüzey kaplaması olarak kullanılabilir (Vogt ve Nauth, 2015; Natural Resources Canada, 2014; Canadian Wood Council, 2021).

Tabakalı Kaplama Kereste (TKK)

Tabakalı kaplama kereste (TKK), bir tür yapısal kompozit kereste olup, kontrplaktan farklı olarak, kaplama tabakalarının lif yönünde yapıştırılmasıyla üretilir; kontrplakta ise tabakalar çaprazlamasına lamine edilmiştir. TKK, kaplama esaslı MAM ailesinin en önemli üyelerinden biridir (Ansell, 2015). Bu malzeme, II. Dünya Savaşı sırasında uçak pervaneleri ve diğer yüksek mukavemetli uçak bileşenlerini üretmek için ilk kez kullanılmıştır (Canadian Wood Council, 1997; Canadian Wood Council, 2021). TKK'nin araştırma ve geliştirme çalışmaları, 1940'lı yıllara kadar uzanmakta olup, Sitka ladini kaplamasından yüksek dayanımlı uçak

yapısı parçaları üretmeyi amaçlamıştır (Forest Products Laboratory, 2010). TKK, 1970’lerin ortalarından itibaren inşaat malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Canadian Wood Council, 1997; Canadian Wood Council, 2021; Hsu, 2016); bu dönemde araştırmalar, TKK üretim değişkenlerinin etkilerini, 12,7 mm kalınlığa kadar olan TKK’ler üzerinde incelemeye odaklanmıştır (Forest Products Laboratory, 2010). Günümüzde TKK, hem yapı hem de ambalaj malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Canadian Wood Council, 1997).

Tabakalı Kaplama Kereste Üretimi

Kaplama üretim ve kurutma süreçleri, kontrplak üretiminde kullanılanlarla neredeyse aynıdır. TKK’nin kontrplak üretiminden farklı süreçleri bulunmaktadır. Bu süreçler büyük ölçüde kaplama tabakalarının yerleştirilme yönü, sıcak pres tipi ve gerekli uzunluğu elde etmek için uç kesimi gibi adımları içerir.

Kaplama levhaları üretmek için tomruklar genellikle bir soyma makinesinde soyulur. Kaplama levhalarının kalınlığı 1,5 mm ile 6,4 mm arasında değişir (Bowyer ve ark., 2007; Hsu, 2016); uzunluğu 2640 mm ve genişliği 1320 mm veya 660 mm (Canadian Wood Council, 1997) olarak belirlenir. Kaplamalar, ideal olarak %6–8, genel olarak ise %6–10 nem içeriğine ulaşana kadar kurutulur (Hsu, 2016). Kaplamalar, dayanımı azaltabilecek kusurların giderilmesi için kesilir ve sınıflandırılır. Kaplama levhaları, TKK üretimi için istenilen genişliğe kesilir (Canadian Wood Council, 1997). Bireysel kaplama levhaları, tüm lif yönleri TKK’in uzunluk yönünde olacak şekilde birleştirilir. Farklı kaplama parçaları arasındaki uç birleşimleri, dayanımı azaltabilecek kusurların dağıtılması için TKK boyunca kaydırılır. Yüğü etkili bir şekilde iletmek amacıyla birleşimler, bazı durumlarda kamalı birleştirme veya bir miktar üst üste bindirilme ile yapılabilir (Canadian Wood Council, 1997). Daha sonra kaplama levhaları, suya dayanıklı fenol-

formaldehit yapıştırıcı (Canadian Wood Council, 1997; Canadian Wood Council, 2021; Hsu, 2016) veya fenol-resorsinol-formaldehit ya da poliüretan yapıştırıcılar ile kaplanır (Gong, 2021).

TKK'in kaplama yerleştirme yöntemi, kontrplak ile farklıdır. TKK üretiminde tüm kaplamalar aynı yönde, yani odunun boyuna lif yönünde yerleştirilir; bu, söz konusu yönde yüksek mukavemet sağlar ve dayanımı katı keresteye eşit veya daha yüksek olabilir. Bu nedenle TKK, genellikle bina inşaatlarında kiriş ve kolonlar için kullanılır (Ansell, 2015; Natural Resources Canada, 2014). Öte yandan kontrplakta kaplama levhaları çaprazlamasına lamine edilmiştir, bu sayede iki yönlü özellikler kazanır; yani hem ana hem de yan yönde benzer mekanik özellikler gösterir ve bu özellikleriyle kaplama malzemesi olarak uygundur.

TKK kaplamalarının ön presleme işlemi, tek açıklıklı soğuk pres veya kısa süreli soğuk pres kullanılarak gerçekleştirilebilir (Hsu, 2016). Daha sonra kaplamayı sıkıştırmak ve yapıştırıcının kürlenmesini hızlandırmak amacıyla basınca ve ısıya eş zamanlı olarak maruz bırakılır (Canadian Wood Council, 1997). Genel olarak TKK üretiminde kullanılan pres sıcaklığı nadiren 175°C'nin üzerine çıkar. Parti tipi preslerde genellikle 160°C kullanılır. Sürekli preslerde ise ön ısıtma bölgesi bulunduğu için sıcaklık önemli ölçüde daha yüksek olabilir. Kaplama levhaları nispeten düşük geçirgenliğe sahip olduğundan, özellikle uzun presleme süreleriyle birleştirildiğinde yüksek pres sıcaklıklarından kaçınılması önerilmektedir (Hsu, 2016). Bu süreç, kontrplak üretiminde kullanılan süreçle benzerdir; farkı, TKK için kaplama levhalarının ince düz paneller yerine 25 m uzunluğa kadar uzun kirişler haline getirilmesidir. Kürlenmenin ardından kirişler, TKK ürününün hedef uygulamaları için belirli uzunluk ve genişliklerde testere ile kesilir (Canadian Wood Council, 1997).

TKK üretimi sırasında, kaplamanın kalınlığı ve kalitesi açısından doğru malzeme seçimi büyük önem taşır. Uygun kaplama

kalınlığı, TKK'nin özellikleri ile üretim maliyetleri arasında denge kurulmasına yardımcı olur. TKK üretiminde kullanılacak kaplama, istenen mühendislik özelliklerinin elde edilebilmesi için özenle seçilmelidir. Son ürünün istenen mühendislik özelliklerine sahip olmasını sağlamak amacıyla, kaplama levhalarının ultrasonik tarama ile sınıflandırılması sıkça uygulanır (Canadian Wood Council, 2021). Bireysel kaplamalar genellikle sınıflandırılır; böylece her TKK'in dayanım özellikleri özel olarak belirlenebilir (Natural Resources Canada, 2014). Estetik nedenler ve üstün yüzeysel eğilme dayanımı sağlamak için, en kaliteli kaplama levhaları genellikle yüzey tabakaları olarak kullanılırken, daha düşük kaliteye sahip levhalar iç tabakalar için tercih edilir (Hsu, 2016). Örneğin, TKK'nin nihai kullanım alanı iskele tahtası ise, daha yüksek kaliteye sahip kaplamalar tahtanın dış yüzeylerine yerleştirilir (Canadian Wood Council, 1997).

Kaplama kalınlığı azaldıkça, aynı yoğunluk, kalınlık ve yerleştirme tekniğine sahip bir TKK ürünü için gerekli kaplama sayısı artar. Sonuç olarak, ince kaplamalı TKK'deki kusurlar, kalın kaplamalı TKK'e göre daha fazla yayılır. Bu nedenle, kaplama kalınlığı azaldıkça, özelliklerdeki değişkenlik azalır ve dayanım değerleri artar. Ancak kaplama kalınlığı azaldıkça, reçine miktarı, presleme döngü süresi ve üretim maliyeti artar (Hsu, 2016).

Kaplamanın dayanım özellikleri, genel olarak TKK için kontrplaktan daha kritiktir. Bu nedenle, TKK üreticilerinin kaplamada derin çatlakları bulunan levhaları kullanmaktan kaçınmaları son derece önemlidir. Derin çatlaklar, TKK'nin kesme dayanımı ve rijitliğini azaltabilirken, elastiklik modülü (MOE) üzerinde çok az etkiye sahiptir. Düşük kesme rijitliği, TKK'in MOE değerini de düşürebilir (Hsu, 2016).

Tabakalı Kaplama Kereste Çeşitleri ve Boyutları

TKK, farklı yumuşak ve sert ağaç türlerinden üretilebilir. TTK, 19 mm ile 89 mm arasında ve muhtemelen 178 mm kalınlıklarında temin edilebilir (Canadian Wood Council, 1997; (Canadian Wood Council, 2018)). İnşaatda en sık kullanılan TTK kalınlıkları 38 mm (Forest Products Laboratory, 2010) ve 45 mm (Canadian Wood Council, 1997) olup, bunlardan daha geniş kirişler, iş sahasında birden fazla TTK tabakasının birleştirilmesiyle kolayca oluşturulabilir (Canadian Wood Council, 1997).

Tipik derinlikler 140 mm ile 508 mm arasında değişir. Farklı üreticiler, farklı genişlik ve derinliklerde ürünler de sunabilir. İş sahasında TTK, gerekli uzunluğa kolayca kesilebilir (Canadian Wood Council, 2021). Tipik TTK uzunlukları 14,6 m, 17 m, 18,3 m, 20,1 m ve 24,4 m olarak verilmektedir (Natural Resources Canada, 2014; Canadian Wood Council, 2021; Canadian Wood Council, 2018). TTK, 610 mm veya 1220 mm genişliğinde kirişler şeklinde üretilir. TTK'nin gerekli derinliği, bu kirişlerden kesilerek elde edilir (Canadian Wood Council, 1997).

Tabakalı Kaplama Kerestenin Özellikleri

TKK'in yoğunluğu yaklaşık 480–510 kg/m³ civarındadır (Stora Enso, 2021), bu değer kullanıldığı ağacın yoğunluğuna benzerdir. Katı ahşaba kıyasla, TTK daha stabil özellikler gösterir. Bunun nedeni, doğal kusurların—düğüm, çatlak ve lif eğimi gibi—malzeme boyunca dağıtılması veya üretim sırasında tamamen giderilmesi ve kurutulmuş kaplama ile yapıştırıcıların kullanılmasıdır (Canadian Wood Council, 2021).

TKK, suyu kolayca absorbe edebilir, bu da özellikle kalınlık yönünde boyutsal değişimlere yol açar çünkü bu yönde neredeyse hiç yapıştırıcı sınırlaması yoktur. Bu nedenle, TTK'in iş sahasında depolama ve kurulum sonrası hava koşullarından korunması gerekir (Forest Products Laboratory, 2010; Canadian Wood Council, 2021).

TKK malzemelerinin iş sahasına nakliyesi sırasında paketlenmesi, nem etkisinin en aza indirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Uç ve kenar sızdırmazlığı, TKK ürünlerinin hizmet sırasında nemden korunması ve suyun nüfuz etmesini önlemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Canadian Wood Council, 2021).

TKK üzerinde yapılacak özel kesim, yiv açma veya delme işlemleri, mutlaka üretici talimatlarına uygun olarak gerçekleştirilmelidir. TKK, eş yüksekliğe sahip katı kereste veya yapıştırmalı kirişler gibi davranır ve bu nedenle bağlantı ve montaj gereksinimleri, katı kereste ile aynıdır (Natural Resources Canada, 2014). Tasarım, standart kurulum açıklamaları ve performans özellikleri ile ilgili temel bilgi kaynakları, üretici katalogları ve denetim raporları tarafından sağlanır (Canadian Wood Council, 2021).

Tabakalı Kaplama Kerestenin Kullanım Alanları

TKK, esas olarak konut ve endüstriyel binalarda yapısal çerçeveleme için kullanılır. İnşaat sektöründe, TKK yaygın olarak kirişler veya pencere ve kapı üstlerindeki başlıklar, kırma ve vadi kirişleri, iskele tahtaları ve I-kirişlerin flanş malzemesi olarak kullanılır (Forest Products Laboratory, 2010; Natural Resources Canada, 2014). TKK ayrıca kamyon kasası kaplaması ve yol levhası direkleri gibi uygulamalarda da kullanılabilir. TKK çoğunlukla görselliğin önemli olmadığı gizli alanlarda yapısal bir bileşen olarak kullanılır. Bazı üreticiler bitmiş veya mimari görünümde ürünler sunmakta, ancak bu genellikle ek maliyet getirir. Estetiğin önemli olduğu uygulamalarda TKK kullanılırken, standart ahşap yüzey işlemleri uygulanarak lifler ön plana çıkarılabilir ve yüzey tabakası korunabilir. TKK'nin bitmiş geniş dış tabakası, kontrplak görünümüne benzer (Canadian Wood Council, 2021).

Kaplama esaslı mühendislik ahşap ürünleri (MAM) rüzgâr türbini endüstrisinde de kullanılmaktadır; bu uygulamada ahşap

kaplama levhaları rüzgâr türbini kanatlarının üretiminde kullanılır (Moretti ve Divone, 1986). Önceden, ahşap kanatların boyutu, büyük ve kaliteli ağaç gövdelerinin bulunabilirliği ile sınırlıydı. Buna karşılık, kaplamaya dayalı üretim yöntemi budak gibi doğal kusurları dağıtarak daha yüksek ve öngörülebilir rijitlik özellikleri sunar. Bu sayede daha büyük ahşap kanatlar üretmek mümkün hale gelmiştir. Fiberglas ile karşılaştırıldığında, ahşap laminatlar önemli maliyet avantajı ve daha düşük ağırlık sağlar. Literatürde, karbon kompozit kuşaklarla güçlendirilmiş ve dış yüzeyi fiberglas kompozit tabakasıyla kaplanmış, esas olarak TTK'den üretilmiş kanat örnekleri bulunmaktadır (Decker, 2020). Dünyadaki en büyük rüzgâr türbini kanatlarından biri, 107 metre uzunluğundadır; bu uzunluk bir futbol sahasından bile fazladır. Fransa'nın Cherbourg kentinde üretilen bu kanat, ince cam ve karbon fiber tabakaları ile balsa ağacı kaplamasının kullanıldığı yüksek teknoloji bir sandviç yapıdan meydana gelmektedir (GE News, 2019).

Paralel Şerit Kereste (PŞK)

Paralel şerit kereste (PŞK), esas olarak liflerin elemanın boyuna doğrultusunda hizalandığı kaplama şeritlerinden oluşan bir kompozit malzeme olarak tanımlanmaktadır (Forest Products Laboratory, 2010). PŞK genel olarak lamine şerit kereste ve yönlendirilmiş şerit kereste ile benzerlik gösterir; ancak PŞK, kaplama şeritlerinden üretilmesi bakımından farklıdır. PŞK üretiminde kullanılan kaplama şeritleri, LSL ve OSB'de kullanılan şeritlere göre daha uzundur ve kalınlık-boy oranı yaklaşık 300 olan oldukça yüksek bir boyut oranına sahiptir.

PŞK, yüksek dayanımlı bir ahşap esaslı malzeme üretme amacıyla 1975 yılında Kanada'nın Vancouver kentinde MacMillan Bloedel Ltd. tarafından geliştirilmiştir (Smulski, 1997). İlk PŞK tesisi 1982 yılında açılmış ve ürünler ilk kez Expo '86 için ticari olarak satılmıştır. Günümüzde Weyerhaeuser adıyla bilinen

MacMillan Bloedel, PŞK ürünlerini Parallam® marka adıyla ticarileştirip patentleşmiştir. Zaman içinde geliştirilmiş üretim süreçleri sayesinde oldukça büyük ve uzun kirişlerin üretimi mümkün hâle gelmiş; üretim ve satış hacmi ise istikrarlı biçimde artmaya devam etmiştir (Weyerhaeuser, 2014).

Paralel Şerit Kereste Üretimi

PŞK üretim süreci, küçük çaplı ağaçlardan büyük boyutlu elemanların üretilmesine imkân tanıyarak orman kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar (Canadian Wood Council, 2021). PŞK üretimindeki ilk aşamalar, kontrplak veya TTK üretiminde kullanılan süreçlerle benzerdir. Kaplama üretimi için tomruklar soyma makinesinde soyulur (Canadian Wood Council, 1997). Kaplama kalınlığı 3 mm ile 6.4 mm arasında değişmektedir (Forest Products Laboratory, 2010). Daha sonra kaplama levhaları %2–3 nem içeriğine kadar kurutulur ve birbirine paralel olacak şekilde uzun, ince kaplama şeritlerine dilimlenir (Porteous ve Keremani, 2013). Ardından, bu kaplama levhaları 2.4 m uzunluğunda, 13 mm genişliğinde (Canadian Wood Council, 1997) ve 2.54 mm ile 3.175 mm arasında değişen kalınlıklarda dar, uzun kaplama şeritlerine kesilir (Hsu, 2016).

Üretim süreci, tomruk soyma işleminden ve kaplama kesme aşamasında tam genişlikte olmayan kaplamalardan elde edilen malzemelerin kullanılmasına yönelik olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle, süreç kontrplak veya TTK üretiminden çıkan artık malzemeleri kullanır (Forest Products Laboratory, 2010). Kaplama şeritleri, özel ekipmanlar kullanılarak sürekli bir malzeme uzunluk doğrultusunda hizalanır ve sıcak preslemeden önce fenol-formaldehit gibi suya dayanıklı dış mekan yapısal bir yapıştırıcı ile karıştırılır.

Presleme işlemi, kaplama şeritlerini belirli bir ölçüde yoğunlaştırır ve yapıştırıcının kürlenmesi mikrodalga teknolojisinin

yardımıyla gerçekleştirilir (Canadian Wood Council, 1997; Canadian Wood Council, 2021). PŞK üretiminde sürekli bir pres kullanılır; bu pres teorik olarak sınırsız uzunlukta ürün üretebilse de üretim uzunluğu yalnızca taşıma kısıtlamaları ile sınırlıdır (Forest Products Laboratory, 2010).

Paralel Şerit Kereste Çeşitleri ve Boyutları

Kanada'da PŞK üretiminde Douglas göknarı kullanılırken, Amerika Birleşik Devletleri'nde güney sarı çamları tercih edilmektedir. Buna ek olarak, batı çalı kızılğacı ve sarı kavak da kullanılan türler arasındadır (Forest Products Laboratory, 2010; Canadian Wood Council, 2021; Natural Resources Canada, 2014). Genel olarak, diğer ağaç türlerinin kullanılmasına yönelik bir kısıtlama bulunmamaktadır.

PŞK için mevcut stok boyutlarının, mevcut ahşap karkas malzemeleri ve standart boyutlarla uyumlu olması gerekmektedir (Canadian Wood Council, 1997). PŞK kirişleri 89 mm ile 178 mm kalınlık aralığında ve 235 mm ile 457 mm derinlik aralığında üretilmektedir (Canadian Wood Council, 2018). PŞK kolonları ise kare veya dikdörtgen kesitli olup 89 mm, 133 mm veya 178 mm boyutlarında üretilmektedir (Canadian Wood Council, 2018). Daha küçük kalınlıklar da tek katman olarak ya da çok katmanlı uygulamalarda birleştirilerek kullanılabilir (Canadian Wood Council, 1997; Canadian Wood Council, 2021). Daha büyük boyutlar için genellikle çelik bağlantı elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır (Natural Resources Canada, 2014). PŞK, 20 metreye kadar uzunluklarda üretilmektedir (Canadian Wood Council, 2018).

Paralel Şerit Kerestenin Özellikleri

Budaklar, eğri lifler ve çatlaklar gibi doğal kusurlar üretim sürecinde dağıtıldığı veya tamamen ortadan kaldırıldığı için; kurutulmuş ahşap kaplama şeritleriyle kullanılan yapısal yapıştırıcı,

presleme sırasında uygulanan ısı ve basınç ile birleştğinde PŞK'nin masif keresteye göre daha az eğilmesine neden olur. Bu nedenle PŞK, oldukça tutarlı ve homojen bir mühendislik ürünü ahşap malzeme türüdür (Canadian Wood Council, 2021) ve masif odundan çok daha düşük değişkenlik ile daha yüksek taşıma kapasitesi sergiler (Natural Resources Canada, 2014). PŞK'nin yoğunluğu 720 kg/m³ olup, üretimde kullanılan odun türünün yoğunluğuna yakındır (Weyerhaeuser, 2015). PŞK'nin diğer avantajları arasında yüksek dayanımı, yüksek rijitliği ve boyutsal esnekliği yer almaktadır (Canadian Wood Council, 2021). Ayrıca yaklaşık %11 nem içeriğine sahip olması nedeniyle büzülmeye, eğilmeye ve çatlamaya karşı daha dirençlidir (Canadian Wood Council, 2021).

PŞK'in dokusu, ahşap kaplama şeritlerinin lif yönü ve koyu renkli yapıştırıcı çizgileri sayesinde oldukça zengindir. Bu nedenle PŞK, yüksek seviyede bitmiş yüzey görünümü gerektiren uygulamalara çok uygun, görsel açıdan çekici bir yapı malzemesidir (Canadian Wood Council, 2021). Biçilmiş keresteye uygulanan işleme, renklendirme ve yüzey bitirme teknikleri PŞK için de kullanılabilir. Üretim sürecinin sonunda, PŞK tam ölçü hassasiyeti ve yüksek yüzey kalitesi sağlamak amacıyla zımparalanır. Ahşabın sıcaklığını ve dokusunu vurgulamak için yüzeye boya uygulanabilir (Canadian Wood Council, 2021).

Paralel Şerit Kerestenin Kullanım Alanları

PŞK, ağırlıklı olarak konut, ticari ve endüstriyel yapılarda kiriş ve kolon gibi yapısal taşıyıcı elemanlar olarak kullanılmaktadır. Dikme-kiriş sistemlerde kiriş ve kolonlarda; hafif çerçeve sistemlerde ise lentolar, başlık kirişleri ve destek elemanlarında yaygın olarak uygulanır (Canadian Wood Council, 1997). PŞK'in üstün dayanım özellikleri sayesinde geniş açıklıklı çatıların ve açık hacimli mekânların tasarlanması mümkün olmaktadır. Ayrıca PŞK görsel olarak çekici bir malzemedir ve bitmiş görünümün önemli

olduğu uygulamalar için oldukça uygundur. Bunun yanında, görünümün önemli olmadığı gizli yapısal uygulamalarda da etkili bir şekilde kullanılabilir (Canadian Wood Council, 1997).

Sonuç

Mühendislik ürünü ahşap malzemeler (MAM'lar), nispeten yeni yapısal elemanlar olup Kuzey Amerika başta olmak üzere dünya genelinde yapı sektöründe geniş çapta kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler, ahşap binalar ve mobilyalar üretmek amacıyla geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuştur. Kaplama esaslı MAM ailesi temel olarak üç ana üyeden oluşur: kontrplak, TTK ve PŞK. Kaplama esaslı MAM'ların büyük çoğunluğu nispeten yüksek yükleri taşıyacak şekilde tasarlandığından, gerekli mühendislik tasarım değerleri ve kullanım koşullarının karşılanabilmesi için tanınmış standartlar veya teknik kılavuzlara uygun şekilde üretilmeleri gerekmektedir. Kaplama esaslı MAM'lar, yapı sektöründe üst düzey yapısal malzemeler olarak kabul görmekte ve tanınmaktadır. Bu ürünleri küçük çaplı kütüklerden oldukça büyük boyutlarda üretmek mümkündür. Bu noktadaki tek sınırlayıcı unsur, TTK ve PŞK elemanlarının taşınması sırasında ortaya çıkan uzunluk kısıtıdır (Hsu, 2016).

Geleneksel olmayan kaynaklar (örneğin yeterince kullanılmayan ağaç türleri), kaplama esaslı mühendislik ahşap ürünlerinin (MAM) üretiminde kullanılabilir ve bu ürünler, geleneksel yapısal ürünlere (örneğin masif ahşap ürünlere) göre daha iyi fiziksel ve mekanik özellikler gösterebilir (Thelandersson ve Larsen, 2003). Mühendislik tasarımı, kusurların giderilmesi, odun malzemelerin kurutulması, yapıştırıcı uygulanması ve katmanlı bir biçimde birleştirilmesi sayesinde, kaplama esaslı MAM'lar aynı boyuttaki masif oduna göre daha dayanıklı ve daha yüksek mukavemetlidir. Bu durum, yüksek dayanım gerektiren ancak hacimli bir görünüme ihtiyaç duyulmayan yapıların inşasında

önemli bir avantaj sağlar. Tipik olarak TKK ve PŞK, benzer boyutlardaki kereste ürünlerine kıyasla yaklaşık üç kat daha yüksek eğilme direncine ve %30 daha fazla rijitliğe sahiptir (Canadian Wood Council, 2018).

Kaplama esaslı mühendislik ahşap ürünlerine (MAM) olan ilgi, ekolojik nedenlerle artmaya devam edecektir. Örneğin, birçok ülkede büyük çaplı, yaşlı orman ağaçlarının kesimine yönelik kısıtlamalar getirilmiştir. İnşaat sektöründeki ihtiyaçlar nedeniyle, alternatif malzemelerin daha fazla geliştirilmesi gerekmektedir. Teknolojideki hızlı gelişmeler ile küçük boyutlu, hızlı büyüyen ağaçlar gibi mevcut hammaddeler, MAM'ların gelişimini kaçınılmaz olarak hızlandıracaktır (Bodig ve Jayne, 1993). Ayrıca son yıllarda, inşaat sektöründe karbon ayak izinin azaltılması konusunda genel bir uzlaşma oluşmuştur. Birçok mimar ve mühendis, %100 masif ahşap ve MAM ürünleriyle binalar tasarlayıp inşa etmektedir. Bununla birlikte, kaplama esaslı MAM'ların standardizasyonu ve kullanım alanlarının genişletilmesine yönelik araştırmaların da şüphesiz gerekli olduğu açıktır. Mevcut ekipmanların modernizasyonu ve yapıştırma sistemlerinin geliştirilmesi, günümüzde ahşap ürünlerde bulunmayan yenilikçi tasarımların ve özel şekillerin oluşturulmasına imkan sağlayacaktır. Bu durum, kaplama esaslı MAM'ların kullanım alanlarını önemli ölçüde genişletecek ve yapı malzemeleri pazarında daha rekabetçi hale gelmelerini sağlayacaktır.

Kaynakça

Ansell, M. P. (2015). Wood composites. Elsevier Science & Technology.

Bodig, J., & Jayne, B. A. (1993). Mechanics of wood and wood composites (Reprint ed.). Krieger Publishing Company.

Bowyer, J. L., Shmulsky, R., & Haygreen, J. G. (2007). Forest products and wood science: An introduction (5th ed.). Wiley-Blackwell.

Canada NR. (2014). Oriented strand lumber. <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/forests-forestry/forest-industry-trade/forest-productsapplications/taxonomy-wood-products/oriented-strand-lumber/15827>

Canada NR. (2014). Plywood. <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/forests-forestry/forest-industry-trade/forest-productsapplications/taxonomy-wood-products/plywood/15855>

Canadian Plywood Association. (2021). Plywood design fundamentals. <https://tolko.com/wp-content/uploads/2020/05/Plywood-Design-Fundamentals-Canadian-Plywood-Association.pdf>

Canadian Wood Council. (1997). Wood reference handbook. Canadian Wood Council.

Decker, K. D. (2020). Reorienting the economy to the rhythms of nature: Learning to live with intermittent energy supply. *American Journal of Economics and Sociology*, 79, 877–905. <https://doi.org/10.1111/ajes.12333>

Filippovich, A. (2018). Plywood history: From ancient Egypt to mid-twentieth century, part 1. *Lesprominform*, 3, 104–113.

Forest Products Laboratory. (2010). Wood handbook—Wood as an engineering material (FPL-GTR-190). U.S. Department of Agriculture.

GE News. (2019). Extreme measures: At 107 meters, the world's largest wind turbine blade is longer than a football field. <https://www.ge.com/news/reports/extreme-measures-107-meters-worlds-largest-wind-turbine-blade-longer-football-field-heres-looks-like>

Gong, M. (2019). Lumber-based mass timber products in construction. In M. Gong (Ed.), Engineered wood products for construction (pp. 7–16). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85808>

Gong, M. (2021). Wood technology, lecture on wood products. University of New Brunswick.

Haygreen, J. G., Bowyer, J. L., & Shmulsky, R. (2007). Forest products and wood science. Wiley-Blackwell.

Hsu, W. E. (2016). Structural composite lumber manufacturing. CreateSpace Independent Publishing Platform.

Introduction to Wood Design. (2018). Canadian Wood Council.

Laminated Veneer Lumber. (2021). Canadian Wood Council. <https://cwc.ca/how-to-build-with-wood/wood-products/structural-composite/laminate-veneer-lumber/>

McIntyre, R. B. (1944). Design features of the Mosquito. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 16, 64–67. <https://doi.org/10.1108/eb031101>

Moretti, P. M., & Divone, L. V. (1986). Modern windmills. Scientific American, 254, 110–119.

Plywood. (2021). Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Plywood&oldid=1028259276>

Plywood – Sizes – Grades. (2021). Canadian Wood Council.
<https://cwc.ca/how-to-build-with-wood/wood-products/panel-products/plywood/>

Porteous, J., & Kermani, A. (2013). Structural timber design to Eurocode 5. John Wiley & Sons.

Sellers, T. (1985). Plywood and adhesive technology. CRC Press.

Smulski, S. (1997). Engineered wood products: A guide for specifiers, designers & users. PFS Research Foundation.

Stora Enso Wood Products GmbH. (2021). LVL by Stora Enso technical brochure. <https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/product-brochures/woodproducts/lvl-by-stora-enso-technicalbrochure-en.pdf>

Thelandersson, S., & Larsen, H. J. (2003). Timber engineering. Wiley.

ThinkWood CEU. (2021). Design and construction of taller wood buildings. <https://www.thinkwood.com/wp-content/uploads/2019/09/ThinkWood-CEU-Design-and-Construction-of-Taller-Wood-Buildings.pdf>

Vogt, F., & Nauth, M. (2015). Carpentry. Nelson Education Limited.

Weyerhaeuser. (2014). Weyerhaeuser uses strong scraps. Wood Business. <https://www.woodbusiness.ca/weyerhaeuser-strong-scraps-1859/>

WoodSolutions. (2021). Structural grading.
<https://www.woodsolutions.com.au/articles/structural-grading>

World FAO. (2021). Yearbook of forest products 2000, 2005, 2010, 2015, 2019. <https://doi.org/10.4060/cb3795m>

BÖLÜM 2

ODUN-PLASTİK KOMPOZİT MALZEME BİLİMİ

İlkay ATAR¹

Fatih MENGELOĞLU²

Giriş

Odun-plastik kompozit (OPK), kereste, kaplama, lif veya parçacık gibi odun kökenli materyallerin plastiklerle birleştirilerek oluşturulduğu birleşik malzemeyi tanımlayan genel bir terimdir. Bu terim geniş kapsamlıdır ve odun öğeleri hem ısı ile sertleşen hem de ısı ile şekillenen plastiklerle birleştirilebilir. Odun-plastik kompozit terimi, odun-polimer kompozitleri terimiyle aynı anlamda kullanılmakta olup, ısı ile şekillenen veya ısı ile sertleşen plastiklerden üretilen odun kompozitleri çoğu zaman ayrı malzeme türleri olarak sınıflandırılmaktadır (Forest Products Laboratory, 2010).

En erken odun-plastik kompozitler yaklaşık bir asır önce ortaya çıkmış olup, odun unu fenol-formaldehit reçinesiyle birleştirilerek otomobil vites topuzu olarak kullanılan bir kompozit malzeme üretilmiştir (Gordon, 1988). Odunun ısı ile sertleşen

¹ Doç. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9527-1791

² Prof. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-2614-3662

polimerlerle birleştirilmesiyle elde edilen kompozitlere ilişkin kapsamlı bir değerlendirme Rowell ve Konkol tarafından sunulmuştur (Rowell ve Konkol, 1987). Odun talaşının ısı ile şekillenen plastik reğinelerle ekstrüzyon yöntemiyle birleştirilmesine yönelik erken kaynak ise 60 yıldan daha eski bir tarihe dayanmaktadır (Simonds ve ark., 1952). Termoplastik plastiklerden üretilen odun–plastik kompozitlere ilişkin daha güncel kaynaklar arasında Oksman ve diğerleri (Oksman Niska ve Sain, 2008) ile Klyosov (Klyosov, 2007) yer almaktadır. Ayrıca, biyolojik kökenli plastik bağlayıcılar kullanılarak üretilen çevre dostu kompozitler de dikkat çekicidir (Bogoeva-Gaceva ve ark., 2007).

Resim 1 Odun–plastik kompozit (OPK) Malzeme



Kaynak: URL: <https://mrswoodcraft.com/blog/what-is-wpc-material>

Üretim Süreçleri

Odun–plastik kompozitlerin başlıca üretim süreçleri ekstrüzyon, enjeksiyonla kalıplama ve pres kalıplama ya da ısıl şekillendirme'dir. OPK'lar için daha yeni üretim yöntemleri arasında, kaynaştırılmış katman modelleme ve lazer sinterleme yoluyla yapılan eklemeli imalat da bulunmaktadır (Gephardt, 2012; İbrahim ve ark., 2014; Wendel ve ark., 2008; Jiang ve ark., 2013).

Ekstrüzyon İşlemi

Ekstruder, odun–plastik kompozit (OPK) profil üretim sisteminin temel bileşenidir ve ekstruderin birincil görevi plastiği eritmek, plastik, odun ve katkı maddelerini karıştırmaktır; bu işleme "karışım hazırlama" denir. Ayrıca ekstruder, hazırlanmış olan odun–plastik karışımını kalıptan geçirerek iletir.

OPK profillerinin işlenmesinde kullanılan dört temel ekstrüzyon sistemi bulunmaktadır:

- Tek vidalı ekstruder,
- Eş yönde dönen çift vidalı ekstruder,
- Zıt yönde dönen çift vidalı ekstruder,
- Woodtruder™.

Tek vidalı ekstruder

Tek vidalı ekstruder, OPK profilleri üretmek için kullanılan en basit ekstrüzyon sistemidir. Tipik bir tek vidalı ekstruder, 34:1'lik bir gövde uzunluğu/çap (L/D) oranına sahiptir. Bu sistemde iki temel aşama bulunur: eritme ve ölçülendirme. Ayrıca uçucu maddelerin uzaklaştırılması için bir havalandırma bölümü bulunur.

Tek vidalı ekstruder için kullanılan malzeme formu, önceden karıştırılmış (ön-işlenmiş) lif dolgulu plastik tanecikleridir. Taneciklerin kurutulması gerektiğinden çoğu zaman bir kurutucu da kullanılır. Malzeme besleme yöntemi genellikle yerçekimiyle çalışan bir hazne aracılığıyla yapılır.

Eritme/karıştırma mekanizması, gövde ısısı ve vidanın uyguladığı kayma kuvveti ile gerçekleşir.

Avantajları: Uzun süredir kullanılan ve kendini kanıtlamış bir teknolojidir. İlk yatırım maliyeti diğer ekstruder türlerine göre daha düşüktür.

Dezavantajları: Hammadde maliyeti yüksektir. Üretim kapasitesi diğer sistemlere göre düşüktür. Kurutma sistemi gerektirir. Plastik, lifle birlikte eritildiği için liflerin ısıl bozunma riski yüksektir. Yüksek vida devri (rpm), vida ucunda yanma riskini artırır. Yüksek kafa basıncında eriyik sıcaklığını düşük tutmak zordur.

Zıt yönde dönen çift vidalı ekstrüzyon

Zıt yönde dönen çift vidalı ekstruderler, ısıya duyarlı plastiklerin (örneğin rijit PVC) işlendiği uygulamalarda; lifler ve köpükler için düşük sıcaklıklı ekstrüzyonda; önceden karıştırılmamış toz karışımları gibi malzemelerde; beslemesi zor olan maddelerde ve gaz giderme gerektiren durumlarda son derece başarılıdır. Bu ekstruder türünde vidalar paralel veya konik yapıdadır. Lif/odun unu ile plastik genellikle aynı tanecik boyutundadır (250–400 µm). Malzeme hazırlığı, liflerin kurutulması ve ardından plastik ile katkı maddeleriyle yüksek yoğunluklu karıştırma işlemini içerir. Malzeme besleme yöntemi çoğunlukla baskılı besleyici kullanılarak yapılır. Eritme/karıştırma mekanizması gövde ısı ve vidanın karıştırma etkisiyle gerçekleşir. Vida karışımı, vida kanadı boşlukları ve dişli karıştırıcılar ile sağlanır. Nem, vakumlu havalandırma ile uzaklaştırılır.

Avantajları: Vida devri (rpm) düşüktür. Kesme kuvveti düşük karıştırma sağlar; lif yanması riski azdır. Kendini kanıtlamış bir teknolojidir.

Dezavantajları: Kurutma sistemi gerektirir. Beslenen malzemeler için bir boyut küçültme sistemi gerekebilir. Ön karıştırma zorunludur. Malzeme taşıma koşulları karışım besleme oranlarını olumsuz etkileyebilir.

Eş yönde dönen çift vidalı ve sıcak eriyik (hot-melt) tek vidalı odun kompozit sistemi

Eş yönde dönen çift vidalı bir ekstruder ile sıcak eriyik tek vidalı bir ekstruderin birlikte kullanılmasıyla odun–plastik kompozit profiller üretilir. Bu sistemde 40:1 L/D oranına sahip paralel eş yönde dönen çift vidalı ekstruder, 10:1 L/D oranına sahip sıcak eriyik tek vidalı ekstruderle birleştirilir. Bu sistemde kullanılan malzeme, ortam nemine sahip (yaklaşık %5–8) odun unu veya lifidir; plastik ile katkı maddeleri doğal hâllerıyla beslenebilir. Bileşenlerin önceden karıştırılması gibi bir malzeme hazırlığına gerek yoktur. Tercih edilen malzeme besleme sistemleri gravimetrik besleyiciler ve çift vidalı yan besleyicilerdir. Eritme/karıştırma mekanizması gövde ısısı, vida devri (rpm) ve vida karıştırması ile gerçekleşir. Nem uzaklaştırma işlemi ise atmosferik ve vakumlu havalandırma ile yapılır.

Avantajları: Odunun ortam nemiyle işlenebilmesi; böylece lif kurutma ve ön karıştırma işlemlerinin ortadan kalkması. Lif ile plastik arasında iyi karışım sağlanması.

Dezavantajları: Çevresel (yan) besleme sistemlerine ihtiyaç duyar. Yüksek vida devri (rpm) ve vida soğutmasının olmaması (yanma riskini artırır). Yüksek kafa basıncında eriyik sıcaklığının düşük tutulmaması. Plastik hala lifle birlikte eritildiğinden yanma riski daha yüksektir ve gaz giderme daha zordur.

Woodtruder™

Woodtruder™ sistemi; 28:1 L/D oranına sahip paralel, zıt yönde dönen çift vidalı bir ekstruder, 75 mm tek vidalı bir ekstruder, bir karıştırma ünitesi, bilgisayarlı bir karışım kontrol sistemi, kalıp sistemi, tahrikli makaralara sahip su püskürtmeli soğutma tankı, hareketli kesme testeresi ve çıkış masası gibi bileşenlerden oluşur.

Üretim süreci başladığında, ortam nemine sahip odununu sisteme beslenir ve çift vidalı ekstruder içinde kurutulur. Bu sırada plastikler, liften ayrı olarak eritilir. Eritme/karıştırma mekanizması gövde ısısı ve vidanın karıştırma etkisi ile gerçekleşir. Odun taşıma işlemi ile plastiğin eritilmesinin birbirinden ayrılması sayesinde, liflerin plastik eritme sırasında yanması engellenir ve erimiş plastik lifleri tamamen kaplar. Daha sonra bu malzemeler karıştırılır ve kalan nem veya uçucular vakumlu havalandırma ile uzaklaştırılır.

Bu sistemde odununu ve katkı maddeleri doğal hâlleriyle kullanılabilir; ayrıca malzeme ön hazırlığı gerekmez. Malzeme beslemesi için gravimetrik besleyiciler tercih edilir.

Woodtruder™ sisteminin avantajları: Lifi ortam nemi (%5–8) ile işleyebilme. Plastiğin liften ayrı bir bölgede eritilmesi (yanma riskinin azalması). Lif/plastik karışımının çok iyi olması. Çift vidalı bölümde vida soğutmasının bulunması. Yüksek kafa basıncında bile düşük eriyik sıcaklığının korunabilmesi. Üstün gaz giderme performansı. Kurutucu, boyut küçültücü ve ön karıştırma ekipmanına ihtiyaç duymaması. Malzeme beslemesi ve ekstruder operasyonları için oldukça esnek, entegre bir kontrol sistemi sunması.

Dezavantajları: Ürün çıkış hızının (üretim kapasitesinin) daha düşük olması. İlk yatırım maliyetinin yüksek olması. Ana ekstruderi kurutucu olarak kullanmak, kuru odununu işlemek için en verimli yöntem değildir.

Ekstrüder sonrası işlemler

Ekstruderle birlikte, kalıp OPK profil ekstrüzyon sisteminin önemli bir parçasıdır. Kalıp, ekstrüze edilen ürünün boyutlarını ve şeklini belirler. Genellikle bant tipi veya kartuş tipi ısıtıcılarla ısıtılır ve içi boş profillerin uygun şekilde işlenebilmesi için hava soğutma da kullanılabilir. İstenen profil geometrisine bağlı olarak kalıplar oldukça basit ya da çok karmaşık olabilir. Kalıptan sonra soğutma

tankı bulunur. Bu tank, ekstrüze edilen profilin doğrusal şeklini sabitlemek için kullanılır. Soğutma tankı, profil üzerine soğuk su püskürten su püskürtme başlıklarına sahip bir taşıyıcı sistemden oluşur. Ekstruderin malzeme çıkış hızına ve gerekli soğutma kapasitesine bağlı olarak tankın uzunluğu genellikle 6 ila 12 metre arasında değişir. Püskürtülen su genellikle geri dönüştürülür ve suyun soğuk kalması için bir soğutucu veya ısı değiştirici kullanılır. Soğutma tankından sonra OPK profil, istenen uzunluklarda kesilmesini sağlayan bir kesme testeresinden geçirilir.

Enjeksiyonla Kalıplama

Odun-plastik kompozitlerin enjeksiyonla kalıplanması, karmaşık geometrilere sahip ve sonradan ek bir yüzey işlemi gerektirmeyen parçaların üretilmesinde kullanılır. Bu yöntem tipik bir örnek, korkuluk sistemlerinde kullanılan direk başlıklarıdır.

OPK'ların enjeksiyonla kalıplama sürecine yönelik araştırmalar, ekstrüzyona göre daha sınırlıdır; ancak araştırma konuları genellikle benzerdir ve malzeme bileşimleri ile özellikleri üzerinde yoğunlaşır (Kuo ve ark., 2009). Ayrıca, enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle OPK mikro gözenekli köpük üretimine ilişkin çalışmalar (Gosselin ve ark., 2006a; Gosselin ve ark., 2006b) ve biyoplastikler kullanılarak OPK enjeksiyonla kalıplama uygulamaları da rapor edilmiştir (Sykacek ve ark., 2009).

Enjeksiyon kalıplama, molding adı verilen polimer ürünlerin üretildiği döngüsel bir süreçtir. Bu işlem, polimerin enjeksiyon kalıplama makinesinin plastikleştirme ünitesinde döngüsel olarak eritilmesini ve ardından erimiş polimerin, plastikleştirme ünitesinde oluşan basınç altında enjeksiyon kalıbına verilmesini ve ürünü şekillendirmeyi içerir. Ekstrüzyon gibi burada da erime, polimerin ısıtma sistemi ile ısınması ve malzeme içindeki enerji dağılımı sonucu gerçekleşir.

Plastikleştirme ünitesi, enjeksiyon kalıplama makinesinin temel bileşenidir ve ekstrüderdeki benzer işlevleri yerine getirir. Ancak burada bazı temel farklar vardır. Dönen vida, erimiş polimeri vida önüne iletir ve ardından polimer, vidanın eksenel hareketi ile kalıba enjekte edilir.

Pres Kalıplama veya Isıl Şekillendirme

Odun-plastik kompozitlerin pres kalıplaması veya ısıl şekillendirilmesi uzun yıllardır araştırılmakta olup, özellikle otomotiv kompozit parçalarının üretiminde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Holbery ve Houston, 2006). Sürekli bant preslerinin kullanılmasıyla OPK panellerin ve cam lif takviyeli OPK panellerin üretilebildiği de gösterilmiştir (Gardner ve Han, 2010; Gardner ve ark., 2011).

Malzeme Alanındaki Gelişmeler

Plastik (Polimer) Matrisler

OPK'larda kullanılan polimerler için önemli bir kısıtlama, ahşap dolguyu termal olarak bozmayacak işlem koşullarının (erime sıcaklığı, basınç) gerekli olmasıdır Odun yaklaşık 220 °C civarında bozulmaya başlar; bu nedenle OPK üretiminde genellikle genel amaçlı plastikler tercih edilir.

Bu alandaki geniş kapsamlı araştırmalar, özellikle aşağıdaki plastikler üzerinde yoğunlaşmıştır: polietilen (PE) (Adhikary ve ark., 2008; Atar, 2021; Durmaz ve ark, 2024; Durmaz ve ark., 2023a; Durmaz ve ark., 2023b), polipropilen (PP) (Espert ve ark., 2004; Atar, 2024; Atar, 2025; Kılıç ve ark., 2024; Kılıç ve ark., 2023), polivinil klorür (PVC) (Jiang ve Kamdem, 2004; Atar ve ark., 2017), polistiren (PS) (Poletto ve ark., 2011), polimetil metakrilat (PMMA) (Kumar ve ark., 2006). Bu plastiklerin dayanım özellikleri, odun liflerinin eklenmesiyle artırılabilir; ancak ortaya çıkan kompozitlerin dayanımı, çoğu mühendislik uygulamasının beklediği seviyelerde

değildir. Biyokompozit üretimine yönelik bilgi birikimi arttıkça, mühendislik tipi plastiklerin OPK uygulamalarında kullanımı da araştırılmaya başlanmıştır.

Naylon 66, motor kaputu altı uygulamalar için potansiyel bir kullanım amacıyla OPK'larda matris malzemesi olarak incelenmiştir (Chen ve Gardner, 2008). Çalışmanın sonuçları, saf naylon 66'ya kıyasla odun–naylon OPK'nın depolama modülünün ve termal kararlılığının arttığını, camsı geçiş sıcaklığının ise azaldığını göstermiştir. Bazı durumlarda, mühendislik plastikleri genel amaçlı plastiklere eklenerek polimer karışımları oluşturulur. Lei ve Wu, polietilen tereftalat (PET) ile yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) karışımlarını elde etmek için iki aşamalı bir ekstrüzyon işlemi uygulamış ve bu karışımlara odun unu eklemiştir (Lei ve Wu, 2010). İkinci ekstrüzyonun sıcaklığı yalnızca HDPE'nin erimesi için kullanıldığından, odun unu termal olarak bozunmamıştır. Odun ununun PET/HDPE karışımının mekanik özelliklerini, depolama modülünü ve matris kristallliğini artırdığı bildirilmiştir. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE)/odun unu kompozitleri pres kalıplama yöntemiyle hazırlanmış ve çekme modülü, eğilme modülü, kayma modülü ve sertlikte iyileşmeler görülmüştür (Mahfoudh ve ark., 2013). Chotirat ve ark. ise odun talaşının akrilonitril–bütadien–stiren (ABS) malzemesinin modülünü artırdığını raporlamıştır (Chotirat ve ark., 2007). Ancak, ahşap ununun zayıf ara yüzey bağlanmasına bağlı olarak kompozitin dayanımını azalttığı belirtilmiştir.

Stiren maleik anhidrit (SMA) kopolimerleri, otomotiv endüstrisinde iç bileşenler için kullanılmaktadır. SMA içerisine odun liflerinin eklenmesi, malzemenin geri dönüştürülebilirliğine ve mekanik özelliklerine katkı sağlamaktadır. Simonsen ve arkadaşları, odun dolguların SMA'nın rijitlik ve dayanımını artırdığını, ancak çentikli Izod darbe dayanımını azalttığını bulmuşlardır (Simonsen ve ark., 1998). Ayrıca, dolgu içeren SMA'nın camsı geçiş sıcaklığının

azaldığı görülmüş ve bu durum araştırmacıları odun unu ile matris arasında kimyasal bağ oluşup oluşmadığını sorgulamaya yöneltmiştir. Wood/SMA kompozitleri üzerine yapılan başka bir çalışmada ise, odun lifleri ile SMA matrisi arasındaki esterleşme reaksiyonundan açığa çıkan suyun, bir köpürtücü ajan olarak kullanılması incelenmiştir (Han ve Gardner, 2010). Pilot ölçekli ekstrüzyon süreciyle üretilen bu SMA esaslı OPK'larda kompozit yoğunluğunun %30'a kadar azaldığı; eğilme dayanımı ve rijitliğinin ise naylon 66'dan daha yüksek seviyelere çıktığı raporlanmıştır.

Biyolojik olarak çözünebilen polimer matrisler, araştırmacıların ilgisini sürekli olarak çekmektedir. Gregorova ve arkadaşları, çözelti dökümünü takiben sıcak presleme yöntemiyle odun lifi/poli laktik asit (PLA) kompozitleri üretmiştir (Gregorova ve ark., 2009). Odun lifi ilavesi, saf PLA'nın camsı geçiş sıcaklığını, Young modülünü ve depolama modülünü artırırken; çekme dayanımı ve kopmada uzama değerlerini düşürmüştür. Odun/PLA kompozitlerinin işlenmesinin bir diğer yolu ise ekstrüzyondur. Farklı ahşap lifi oranlarında üretilmiş odun/PLA bileşimleri (Shah ve ark., 2008) tarafından incelenmiştir. Kompozit dayanımı odun lifi eklenmesiyle artmamış; ancak eğilme modülü ve depolama modülü önemli ölçüde iyileşmiştir.

Lee ve Ohkita, sıcak presleme yöntemiyle üretilmiş odun unu/polikaprolakton (PCL) ve odun unu/polibütlen süksinat-bütlen karbonat (PBSC) kompozitlerinin mekanik ve ısı akış özelliklerini incelemiştir (Lee ve Ohkita, 2003). Odun unu eklenmesi PCL'in rijitliğini önemli ölçüde artırmıştır. Bununla birlikte, hem PCL hem PBSC için kopmada uzama ve çekme dayanımı düşmüştür.

Poli(3-hidroksibütrat) (PHB) de bir OPK matrisi olarak kullanılmış ve biyobozunurluğu değerlendirilmiştir (Râpă ve ark., 2014). Elde edilen sonuçlar, odun/PHB kompozitlerinin biyolojik olarak parçalanabildiğini ve bozunma hızının odun miktarı arttıkça yükseldiğini göstermiştir. Singh ve Mohanty, ekstrüzyon yöntemiyle

Üretilen odun lifleri/polihidroksibütirat-ko-valerat (PHBV) kompozitlerini incelemiştir (Singh ve Mohanty, 2007). Ahşap liflerinin, PHBV'nin çekme, eğilme ve depolama modüllerini artırdığı tespit edilmiştir. Buna karşılık, doğrusal ısıl genleşme katsayısı ve çentikli darbe dayanımı azalmıştır.

Odun Modifikasyonu

Odun lifleri, selüloz ve hemiselülozun moleküler zincirlerinde bulunan hidroksil grupları nedeniyle hidrofiliktir. Buna karşılık, OPK'larda kullanılan çoğu termoplastik hidrofobiktir. Üretim sırasında odun lifleri, hidrojen bağlanması bağlı olarak kümeleşme eğilimindedir. Bu durum odununun polimer matrisi içinde yeterince dağılmamasına yol açabilir ve dolayısıyla odunun güçlendirici etkisi zayıflayabilir. Bazı durumlarda, lif yığılması plastiklerin mekanik özelliklerini de olumsuz etkiler. Bu nedenle, ahşap liflerinin modifikasyonu, geliştirilmiş OPK'lar üretmek için kritik öneme sahiptir.

Isıl İşlem

Odunun ısıl işlemi, odun liflerinin yaklaşık 230 °C sıcaklıkta, ısı ve nem altında şartlandırılarak inert (tepkimeye girmeyen) bir yüzey oluşturulması ve hemiselülozun uzaklaştırılması sürecini ifade eder (Pelaez-Samaniego ve ark., 2013). Andrusyk ve arkadaşları, ekstrakte edilmiş odun unu ve polipropilen kullanarak OPK retmiştir (Andrusyk ve ark., 2008). Bu işlem sonucunda kompozitin mekanik özelliklerinde önemli derecede iyileşme görülmüştür. Alev yayılımı, özgül ağırlık ve ısıl genleşme değerleri ise işlem sonrasında değişmemiştir. Benzer sonuçlar, güney sarı amının (southern yellow pine)  farklı sıcaklık seviyesinde sıcak su ile ekstrakte edilip polipropilen ile OPK'ya dönüştürüldüğü Hosseinaei'nin araştırmasında da bulunmuştur (Hosseinaei ve ark., 2012). Ekstraksiyon işleminin, malzemenin çekme dayanımını ve ısıl kararlılığını artırdığı belirlenmiştir. PP veya HDPE ile

oluşturulan ve sarıçam içeren kompozitlerde, sıcak su ekstraksiyonu sonrası su alma ve kalınlık artışı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir (Pelaez-Samaniego ve ark., 2013).

Kimyasal İşlem

Odun liflerinin hidrofobikliğini değiştirmeye ek olarak, kimyasal işlemler; yüzeydeki fonksiyonel gruplarla reaksiyona girerek odun liflerine yeni fonksiyonel gruplar kazandırabilir (Li ve ark., 2007). Bu şekilde modifiye edilen odun yüzeyleri, polimer matrislerle daha iyi arayüz bağlanması gösterir. Bağlayıcı ajanlar (coupling agents), iki farklı fonksiyonel uca sahip kimyasallardır. Bu uçlardan biri odun liflerinin hidroksil gruplarıyla reaksiyona girmek için, diğeri ise polimer matrisiyle etkileşime geçmek için kullanılır. Odun liflerini modifiye etmek üzere 40’tan fazla bağlayıcı ajanın kullanımı araştırılmış olup; en yaygın olanlar izosiyanatlar, anhidritler, silanlar ve anhidrit modifiyeli kopolimerlerdir (Lu ve ark., 2000).

Farklı moleküler ağırlıklara sahip iki maleik anhidrit aşılanmış polipropilen (MAPP) kopolimeri, odun ununu işlemek için kullanılmış ve PP kompozitlerinin üretiminde değerlendirilmiştir. PP–odun kompozitlerinde en yüksek çekme dayanımı, MAPP/odun unu oranının 0.05–0.1 aralığında olduğu durumda elde edilmiştir. Daha yüksek moleküler ağırlıklı MAPP, kompozit dayanımını daha fazla artırırken; daha düşük moleküler ağırlıklı MAPP kompozitin işlenebilirliğini anlamlı şekilde geliştirmiştir (Dányádi ve ark., 2007).

Farklı konsantrasyonlarda viniltrimetoksi silan, çift vidalı ekstrüderde yapılan harmanlama sırasında eklenmiştir (Bengtsson ve Oksman, 2006). Elde edilen odun/HDPE kompozitinin tokluğu, darbe dayanımı ve snme özellikleri artmış; ancak eğilme modülü azalmıştır. Bu değişiklikler, silan ile işlenmiş OPK’da polimer matrisinin kristalinitesinin azalmasından kaynaklanmıştır.

Odun unu üzerinde uygulanan çeşitli kimyasal işlemlerin odun/PP kompozitlerinin özelliklerine etkileri karşılaştırılmıştır (Dányádi ve ark., 2010). Benzilasyonun, kompozitin su emmesini azalttığı ancak arayüz yapışmasını olumsuz etkilediği görülmüştür. İki yüzey aktif madde (stearik asit ve selüloz palmitat), OPK'nın çekme dayanımını artırmamış; ancak kompozitlerin homojenliğini ve işlenebilirliğini iyileştirmiştir. Alkali işlem, odununun PP içinde dağılmasını iyileştirmiş ve mekanik özelliklerde hafif bir artış sağlamıştır (Ichazo ve ark., 2001).

Odun lifleri ile HDPE arasındaki uyumsuzluğu azaltmak için odunun asetillenmesi uygulanmıştır (Mbarek ve ark., 2013). Bu işlem arayüz yapışmasını ve çekme modülünü artırmış; ancak kopma uzamasını azaltmıştır. Kavak odun liflerine asetat, propiyonat ve benzoat esterifikasyonları uygulanmıştır (Wei ve ark., 2013). Elde edilen odun lifi/HDPE kompozitlerinin mekanik özellikleri iyileşmiş, mantar saldırısına dayanımı artmış ve hava koşullarına karşı performansı gelişmiştir.

Katkı Maddeleri

Katkı maddeleri, OPK'ların (odun-plastik kompozitlerin) çeşitli amaçlarla kullanılan oldukça önemli bileşenleridir. OPK endüstrisinde kullanılan katkı maddeleri; kaydırıcılar ve akış kontrol katkıları, bağlayıcı ajanlar, stabilizatörler, dolgu maddeleri, yoğunluk azaltıcı katkıları, biyositler, ürün estetiği sağlayan katkıları, alev geciktiriciler ve duman bastırıcıları gibi birçok farklı grubu içerir. Kaydırıcı içeriğinin odun unu/HDPE kompozitlerinin işlenmesi ve özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir (Adhikary ve ark., 2011). Araştırmada, kaydırıcı miktarının artırılmasıyla birlikte kompozitlerin görünür akışkanlığının (viskozitesinin) azaldığı bulunmuştur. Odun lifi, HDPE, maleik anhidrit ile modifiye edilmiş polietilen (MAPE) ve kaydırıcının en uygun oranlarda kullanılması, viskoziteyi düşürerek işlemeyi kolaylaştırırken aynı

zamanda mekanik özelliklerin ve yüzey düzgünlüğünün korunmasını sağlamaktadır. Li ve Wolcott, iki farklı kaydırıcı türü (bir ester ve çinko stearat) eklenerek HDPE/akçaağaç unu kompozitlerinin akış davranışını incelemiştir (Li ve Wolcott, 2006). Ester tipi kaydırıcının, akçaağaç parçacıklarının dağılmasını artırdığı ve iyi dış kaydırma sağladığı rapor edilmiştir.

OPK'ları işlemekte biyositler kullanılmış ve performansları değerlendirilmiştir (Simonsen ve ark., 2005). Kahverengi çürüklük mantarının OPK'larda neden olduğu odun bileşeni kütle kaybının, masif odundakine göre daha az olduğu belirlenmiştir. Bu çürümenin az olması, plastiğin odun parçacıklarını kaplayarak bir koruyucu kılıf oluşturmaya bağlanmaktadır. Na/Ca boratın, çinko borata göre çok az da olsa daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir. Benzer biçimde, Dawson-Andoh ve Matuana, odun unu ve HDPE'den üretilmiş OPK'ları üç farklı konsantrasyonda iki biyositle (gümüş ve çinko) işlemeye tabi tutmuştur (Dawson-Andoh ve Matuana, 2007). Genel olarak, çinko bazlı biyosit mantar gelişimini ve renk bozulmasını etkili bir şekilde kontrol etmiş ve en iyi sonuç 1 % yükleme seviyesinde elde edilmiştir. Buna karşılık, gümüş biyosit mantar gelişimini veya renk bozulmasını engellememiş ve çalışma kapsamı açısından etkisiz olarak değerlendirilmiştir.

Ultraviyole (UV) ışık, odun-plastik kompozitlerin zamanla renk değiştirmesine ve mekanik dayanımlarını yavaş yavaş kaybetmesine yol açar. Bu dayanıklılık sorununu gidermek için, ışık engelleyici amin esaslı dengeleyiciler (HALS) ve ultraviyole emiciler (UVA) gibi dengeleyiciler OPK'lara uygulanmıştır (Muasher ve Sain, 2006). Diester türü HALS, UV'ye maruz kalma sonucu oluşan serbest kökleri yakalayarak OPK'nın rengini koruyabilmektedir. Bu diesterlerin molekül ağırlığı arttıkça kompozitteki renk kararlılığı da artmıştır. Benzotriazol türü UVA ile diester HALS birlikte kullanıldığında, kompozitteki renk solmasını birlikte daha etkili şekilde azaltmışlardır. Chaochanchaikul ve

Sombatsompop, odun/PVC kompozitleri için üç farklı UV dengeleyiciyi incelemiştir (Chaochanchaikul ve Sombatsompop, 2011). UV dengeleyicilerin OPK'nın ışık kaynaklı bozunmasını azalttığı, ancak mekanik özellikleri belirgin şekilde etkilemediğı bulunmuştur. Aynı araştırmacılar, ısı dengeleyicilerin odun/PVC kompozitlerin yapısal ve ısı özelliklerine etkilerini de incelemiştir (Chaochanchaikul ve ark., 2011). Sonuçlar, odun ununun PVC'nin ısı bozunmasını hızlandırdığını, ancak metal stearatlar ve organotin eklenerek bunun iyileştirilebileceğini göstermiştir. Metil kalay merkaptidin, odun/PVC kompozitlerinin ısı kararlılığını artırdığı kanıtlanmıştır. OPK üretiminde demir oksit nanoparçacık kullanın UV kaynaklı bozunmayı sınırladığı ve daha düşük renk değişimlerine yol açtığı bildirilmiştir (Durmaz ve ark., 2024).

MAPE kullanmak yerine, kâğıt ıslak dayanım ajanı olan poliaminoamid-epiklorohidrin (PAE) ve stearik anhidritten oluşan bir uyumlaştırıcı sistem, odun/PE kompozitleri için araştırılmıştır (Geng ve ark., 2004). Sonuçlar, bu sistemin saf odun/PE kompozitlerine kıyasla eğilme direncini (MOR) %33 ve elastikiyet modülünü (MOE) %40 artırdığını göstermiştir. Ayrıca bu katkı sistemi, MAPE ile muamele edilen kompozitlere kıyasla MOE açısından daha iyi performans göstermiş, ancak MOR değeri biraz daha düşük çıkmıştır. Aynı araştırmacı, polidifenilmetan diizosiyanat (PMDI) ve stearik anhidritten oluşan başka bir sistemi odun/PE kompozitleri için incelemiştir (Geng ve ark., 2005). Kompozitlerin MOR ve MOE değerlerinin her ikisi de MAPE ile işlenen örneklerle kıyasla anlamlı derecede yüksek bulunmuştur. MOR ve MOE'deki bu iyileşme, artırılmış ara yüzey yapışması ve geliştirilmiş odun partiküllerinden kaynaklanmaktadır.

Köpürtülmüş OPK'lar; azaltılmış ağırlık ve maliyet, artırılmış darbe dayanımı, güç/ağırlık oranı ve yüzey kalitesi (daha keskin hatlar ve köşeler) gibi avantajlı özelliklere sahiptir (Faruk ve ark., 2007). Üç tip kimyasal köpürtücü ajan (endotermik, ekzotermik

ve endotermik/ekzotermik) karıştırılmış odun lifi ve PP granüllerine eklenmiş ve ardından enjeksiyonla kalıplanmıştır (Bledzki ve Faruk, 2005). Mikro köpüklü kompozitlerde hücre boyutu, çapı ve aralıkları dikkate alındığında, PP matrisinde köpük oluşturmak için en iyi sonuç veren köpürtücüler ekzotermik ajanlar olmuştur. OPK'ların yoğunluğu yaklaşık %30 azaltılmış ve yüzey pürüzlülüğünde %70'e kadar düşüş sağlanmıştır. Zhang ve arkadaşları, CO₂'yi fiziksel şişirici ajan olarak kullanarak mikrohücreli OPK üretmek için çift vidalı bir ekstrüzyon sistemi geliştirmiştir (Zhang ve ark., 2004). Bu ekstrüzyon sisteminin, gelişmiş hücre morfolojisi sergileyen ince hücre yapısına sahip OPK'lar üretebildiği rapor edilmiştir. Başka bir çalışmada ise, otomotiv iç kompozitlerinde kullanılmak üzere enjeksiyon, ekstrüzyon ve sıkıştırma kalıplama proseslerinden elde edilen mikrohücreli OPK'lar araştırılmıştır; hücre morfolojisi, yoğunluk azaltımı, koku emisyonları ve mekanik özellikler açısından en iyi üretim yönteminin enjeksiyon kalıplama olduğu belirlenmiştir (Bledzki ve Faruk, 2006).

OPK'ların yangın performansı, özellikle mobilya ve konut yapılarında kullanılmak üzere tasarlandıklarında oldukça önemlidir. Odun unu/PE kompozitlerinin yangın geciktiricilere karşı davranışını daha iyi anlayabilmek için beş farklı yangın geciktirici sistem (dekabromodifenil oksit, magnezyum hidroksit, çinko borat, melamin fosfat ve amonyum polifosfat) incelenmiştir (Stark ve ark., 2010). Bu beş maddenin tamamı OPK'ların yangın performansını iyileştirmiştir. Başka bir çalışmada yangın geciktirici formülüne doğal çay saponini eklenmiş ve OPK'ların yanma performansı incelenmiştir. Saponin oranının artması ile OPK'ların yangına karşı direncini önemli oranda arttığı bildirilmiştir (Atar, 2024). OPKların yanma direncini arttırmak için çinko oksit nanoparçacıklar kullanılmış ve kompozit malzemenin yangına karşı direncinde artış olduğu görülmüştür (Durmaz ve ark., 2023). İlginç olarak, yalnızca

odun ununun eklenmesi bile yangın performansını belirgin şekilde artırabilmektedir.

Toklaştıracı ajanlar, odun liflerinin polimer matrislerine eklenmesiyle ortaya çıkan düşük darbe dayanımını artırmak için araştırılmıştır. PHA'nın, odun/PLA kompozitlerinin darbe dayanımını artırdığı ancak çekme dayanımı ve termal stabiliteyi olumsuz etkilediği bulunmuştur (Qiang ve ark., 2012a). Stiren-butadien-stiren (SBS) blok kopolimeri de darbe direncini ve kopma anındaki uzamayı artırabilmektedir; ancak bu, çekme dayanımı azaltmaktadır (Qiang ve ark., 2012b). Bu toklaştıracı ajanın OPK'ların termal stabilitesi üzerinde önemli bir etkisi görülmemiştir. OPK'larda plastikleştiriciler de incelenmiştir. Plastikleştirici, odun ununun polimer matrisine eklenmesiyle artan camsı geçiş sıcaklığını (T_g) düşürerek üretimi kolaylaştırabilir (Marathe ve Joshi, 2009). Odun unu/LDPE kompozitleri, plastikleştirici uygulandığında işlem sırasında daha düşük viskozite ve daha az ekstrüzyon torku göstermiştir. Ayrıca daha iyi uzama özellikleri sergilemiştir (Xie ve Jin, 2014).

Selüloz Nanokristalleri ve Nanofibriller

Nanokompozit, fazlarından birinin boyutlarından biri, ikisi veya üçü nanometre ölçeğinde (100 nm'den küçük) olan çok fazlı bir katı malzeme olarak tanımlanır (Mariano ve ark., 2014). Bu nedenle, selüloz nanokompozitleri, takviye elemanlarının selüloz nanopartiküllerinden oluştuğu kompozitlerdir. Selüloz nanopartikülleri, üretim yöntemlerine bağlı olarak iki kategoriye ayrılır. Birincisi selüloz nanokristalleridir (CNC). Hamur lifi, selüloz ve hemiselüloz arasındaki bağları kırarak amorf bölgeleri uzaklaştırmak amacıyla asit ile işlenir; böylece kristalin selüloz lifleri serbest bırakılır (Siró ve Plackett, 2010). Diğer tür ise selüloz nanofibrillerdir (CNF). CNF üretim yöntemi, hamur liflerine eksenine dik bir kesme kuvveti uygulayarak nanoliflerin iç bağlarını

kırar (Xu ve ark., 2013). Bu nedenle CNF'lerde hem kristalin hem de amorf bölgeler bulunur.

Selüloz nanopartiküller olağanüstü özelliklere sahip olduklarından, genellikle polimer matrislere takviye veya fonksiyonel katkı maddesi olarak dahil edilirler. Selüloz nanokristaller (CNC'ler), polimerler için takviye malzemesi olarak selüloz nanofibrillere (CNF'ler) kıyasla daha az incelenmiştir; çünkü CNC'lerin ticari olarak üretilme maliyetleri, CNF üretim sürecine göre önemli ölçüde daha yüksektir. Ayrıca CNF'ler, kompozitte daha büyük bir en-boy oranına ve lif dolanıklığına sahip olduklarından, CNC'lere kıyasla takviye malzemesi olarak daha uygun bir adaydır (Xu ve ark., 2013). Bir diğer neden de, CNC'lerin asit hidrolizi ile termal kararlılığının bozulmuş olmasıdır; bu durum ekstrüzyon gibi üretim süreçlerinde ciddi bir sorun teşkil edebilir (Mariano ve ark., 2014).

CNF'ler için çeşitli termoplastik ve termoset polimer matrisleri araştırılmış ve bu matrislerin malzeme özelliklerini geliştirme etkileri rapor edilmiştir. Malainine ve ark., farklı dolgu seviyelerinde CNF'leri poli(stiren-ko-bütül akrilat) lateksine ekleyerek ve çözeltiden döküm yöntemiyle nanokompozitler üretmiştir (Malainine ve ark., 2005). Polimerin çekme dayanımı, CNF içermeyen durumda 0,552 MPa iken, %10 ağırlık CNF ile 34,5 MPa'ya yükselmiştir. Kopma gerilmesi ise 7,1 MPa'dan 14,5 MPa'ya artmıştır. Leitner ve ark., çözeltiden döküm yöntemi ile CNF/polivinil alkol (PVOH) kompozitleri üretmiştir (Leitner ve ark., 2007). PVOH'nin mekanik özellikleri, dolgu içeriği arttıkça artmıştır. %50 dolgu içeriğinde, PVOH'nin elastik modülü 20 kat ve çekme dayanımı 3,5 kat artmıştır. CNF/mısır nişastası kompozitleri de çözeltiden döküm yöntemi ile üretilmiştir (Alemdar ve Sain, 2008). %10 ağırlık CNF ile nişastanın modülü 111 MPa'dan 271 MPa'ya yükselmiş ve takviye edilmiş nişastanın cam geçiş sıcaklığı saf nişastadan daha yüksek olmuştur. Peng ve ark., CNF/PP

nanokompozitini eritme ve ekstrüzyon yoluyla üretmiş ve bağlayıcı ajan olarak maleik anhidrit polipropilen kullanmıştır (Peng ve ark., 2014). %6 ağırlık lif içeriğinde, takviye edilmiş PP’de çekme modülünde %36, eğilme modülünde %21 ve darbe dayanımında %23 artış gözlemlenmiştir. CNF takviyeli PLA, farklı lif yüklemeleri ile çift vidalı ekstrüzyon yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir (Jonoobi ve ark., 2010). %5 lif yüklemesinde, çekme modülü ve dayanımı sırasıyla %25 ve %23 artmış, cam geçiş sıcaklığı ise 70 °C’den 76 °C’ye yükselmiştir.

Odun–Plastik Kompozitlerin Endüstriyel Uygulamaları ve Üretim Stratejileri

Odun–plastik kompozitlerden üretilen ticari profiller; yapı/inşaat sektöründe zemin kaplaması, çit ve dış cephe kaplaması için kullanılan tahta tipi levhalar; otomotiv sektöründe kalıplanmış plakalar; mobilya sektöründe süsleme/çerçeveleme parçaları; elektrik sektöründe enjeksiyonla üretilmiş parçalar; inşaat mühendisliğinde deniz kıyı duvarları için kullanılan çakma levhalar ve oyuncaklar, müzik aletleri vb. için çeşitli enjeksiyonla kalıplanmış parçaları içerir.

Odun–plastik kompozitlerden üretilen en yaygın profiller, dış mekân döşeme uygulamalarında kullanılan levhalar veya kereste tipi ürünlerdir. Deck (döşeme) levhaları; masif, köpüklü, kanallı, kaplanmış (capstock) veya kaplamalı kesitler olmak üzere piyasada çok çeşitli formlarda bulunmaktadır.

Her ne kadar erken dönem OPK ürünleri ağırlıklı olarak profilli kesitler için ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş olsa da, 2010 yılından bu yana OPK ile üretilen birçok enjeksiyon kalıplı parça elektrik muhafazaları, ambalaj, günlük yaşam ürünleri ve inşaat mühendisliği uygulamaları da dâhil olmak üzere çeşitli sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır.

OPK'ların şekillendirilmesindeki teknik sorunlar; ince profilli duvarlar için ekstrüzyon kalıp tasarımı, enjeksiyon kalıplamada karmaşık yapılar için akış kanalı tasarımı ve tıkanma sorunlarını veya eriyiklerin termal bozunmasını önlemek amacıyla işlem sırasında OPK eriyiğinin düzgün akışının sağlanmasıdır. Buna ek olarak, formülasyonun her bir farklı işlem yöntemi ve hedef uygulama için özelleştirilmesi gerekmektedir.

OPK'larda Dayanıklılık Sorunları ve Araştırmalar

Odun-plastik kompozitlerin dayanıklılığı iki geniş kategori altında incelenir: yapısal dayanıklılık ve estetik dayanıklılık. Yapısal dayanıklılık, özellikle OPK kullanılarak yapılan yapıların güvenliği açısından en önemli unsurdur; ancak estetik dayanıklılık da tüketiciler için en az bunun kadar önemli olabilir. OPK görünümüne ilişkin sorunlar özellikle OPK döşeme ürünlerinde çok sayıda toplu dava açılmasına neden olmuştur (Lauzon, 2013). Küf ve mantar oluşumu ile renk solması, OPK'larda toplu davaların açılmasında etkili olan başlıca dayanıklılık problemleri arasında yer almaktadır.

OPK dayanıklılığı üzerine yapılan en güncel araştırmalar, çeşitli bozunma sorunlarına katkıda bulunan mekanizmaları daha iyi anlamaya ve dayanıklılığı artırmaya yönelik yöntemlere odaklanmaktadır.

Çürüme (Biyolojik Bozunma) Çalışmaları

Ashori ve ark. (2013), OPK'larda kimyasal koruyucu işlemlerin etkilerini incelemiştir. Fungisit ile muamele edilmiş OPK'ların, muamele edilmemiş örneklerle kıyasla çürümeye karşı daha dirençli olduğu gösterilmiştir. Shrip ve Wolcott (2005), mantar kaynaklı çürümenin OPK'ların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. OPK'ların, kompozit formülasyonunda odun ve plastik oranını kontrol ederek mantara karşı iyi bir dayanıklılık sağlayacak şekilde tasarlanabileceği bildirilmiştir.

Fabiyi ve McDonald (2010), odun türünün OPK'ların özellikleri ve hava koşullarına dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada incelenen birçok odun türü arasında, açık renkli odunlar olan hibrit kavak ve ponderosa çamı daha iyi renk kararlılığı göstermiştir. Fabiyi ve ark. (2011), farklı OPK türlerinin biyolojik bozunmasını da incelemiş ve Douglas göknarı türünün beyaz çürümeye karşı daha az duyarlı olduğu bulunmuştur. Kim ve ark. (2008), odun türünün odun-plastik kompozitlerde su emilimi ve dayanıklılık üzerindeki etkisini araştırmıştır. Dayanıklı odun türlerinin OPK'larda kullanılmasıyla dayanıklılık performansının iyileştiği rapor edilmiştir.

Hava Koşullarına Dayanıklılık (Yaşlanma) Çalışmaları

Hava koşullarına maruz kalan OPK yüzeyleri, kızılötesi ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi ile temas açısı analizleri kullanılarak incelenmiştir (Stark ve Matuana, 2007). Yüzey analiz tekniklerinin bir arada kullanılmasıyla, OPK yüzeylerinde hava koşullarına maruz kalma sonucu meydana gelen değişimlerin tam olarak anlaşılabilceği bildirilmiştir. Fabiyi ve ark. (2008), hava koşullarına maruz kalmış OPK'ların görsel görünümü ve kimyasal değişimlerini rapor etmiştir. Hava koşullarına maruz kalma sırasında lignin oksidasyonu ve bozunmasının OPK renk değişimlerini etkilediği belirlenmiştir. OPK'lar üzerine opak bir kaplama eş ekstrüzyonu yapılmasının, hava koşullarına maruz kalan OPK'ların renk değişimlerine karşı direncini artırdığı gösterilmiştir (Stark ve Matuana, 2007). Odunun ısıl işlemi, OPK panellerin boyutsal kararlılığını artırmaktadır [78]. Segerholm ve ark. (2012), yapay olarak yaşlandırılmış odun-plastik kompozitlerde su emilimini incelemiştir. Yapay hava koşulları, polimer matrisinde çatlamalara ve odun-matris ayrışmasına yol açarak OPK'larda artan nem emilimine katkıda bulunmuştur.

Yangına Dayanıklılık Çalışmaları

Garcia ve ark. (2009), yangın geciktirici ve dayanıklılık performansı artırılmış OPK'ları, yangın geciktiriciler ve ışık stabilizatörlerinin bir kombinasyonunun eklenmesiyle rapor etmiştir. Stark ve ark. (2009), polietilen matrisli OPK'larda çeşitli yangın geciktiricileri değerlendirmiştir. Magnezyum hidroksit ve amonyum polifosfatın, OPK'ların yangın performansını iyileştirdiği belirlenmiştir.

Sonuç

Odun-plastik kompozitler (OPK), ahşabın yenilenebilir ve düşük maliyetli yapısal avantajları ile termoplastiklerin işlenebilirlik, dayanıklılık ve boyutsal kararlılık gibi üstün özelliklerini bir araya getiren mühendislik malzemeleri olarak geniş bir uygulama alanı kazanmıştır. Bu kitap bölümünde OPK'ların üretim süreçleri, malzeme bileşenleri, modifikasyon teknikleri, katkı maddeleri, endüstriyel uygulamaları ve dayanıklılık performansları kapsamlı biçimde ele alınmıştır.

Üretim teknolojileri incelendiğinde, ekstrüzyonun hâlen OPK profil üretiminin temel yöntemi olduğu, buna ek olarak enjeksiyonla kalıplama ve pres kalıplama gibi yöntemlerin de özellikle karmaşık geometrilerin ve yüksek performanslı kompozitlerin üretiminde yaygınlaştığı görülmektedir. Woodtruder™ gibi gelişmiş sistemler, lif yanmasını önlemek ve arayüz bağlanmasını iyileştirmek açısından önemli yenilikler sunmaktadır. Aynı şekilde, katkı maddeleri ve bağlayıcı ajanların doğru seçimi, OPK'ların mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin iyileştirilmesinde kritik rol oynamaktadır.

Malzeme bileşenlerinde yaşanan gelişmeler, hem genel amaçlı termoplastiklerin hem de mühendislik polimerlerinin OPK sistemlerine uyarlanmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca biyobozunur matrisler ve selüloz nanopartiküller gibi yenilikçi bileşenler, çevre

dostu kompozitlerin geliştirilmesi açısından gelecek vaat etmektedir. Odun liflerinin ısı, kimyasal ve enerji temelli yöntemlerle modifikasyonu, arayüz bağlanmasını geliştirerek kompozitlerin mekanik performansının artırılmasına önemli katkılar sağlamıştır.

Dayanıklılık açısından yapılan çalışmalar, OPK'ların performansının yalnızca yapısal parametrelerle değil, aynı zamanda estetik kararlılık, renk değişimi, biyolojik bozunma ve hava koşullarına dayanıklılık gibi çok boyutlu faktörlerle belirlendiğini göstermektedir. Küf ve mantar oluşumu, renk solması ve UV kaynaklı yaşlanma, OPK'ların sahadaki performansını sınırlayan başlıca problemler arasında yer almaktadır. Bu nedenle biyositlerin, UV stabilizatörlerinin ve yüzey kaplamalarının geliştirilmesi, OPK dayanıklılığının iyileştirilmesinde önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Yangın geciktiricilerin kullanımı ise OPK'ların yapı sektöründeki kullanım potansiyelini artırmak adına kritik bir gerekliliktir.

Genel olarak, odun-plastik kompozit teknolojisi; malzeme bilimi, kimya, orman ürünleri, polimer mühendisliği ve ileri üretim teknolojilerinin kesişiminde hızla gelişen, dinamik bir araştırma alanıdır. Gelecekte, daha düşük yoğunluklu, yüksek dayanımlı, çevre dostu, geri dönüştürülebilir ve iklim koşullarına karşı daha dirençli OPK sistemlerinin geliştirilmesi ön planda olacaktır. Ayrıca nano-takviyeli kompozitlerin, biyopolimer bazlı matrislerin ve yenilikçi yüzey teknolojilerinin OPK performansına yapacağı katkılar, araştırma ve endüstri işbirlikleri açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.

Kaynakça

Adhikary, K. B., Pang, S. S., & Staiger, M. P. (2008). Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B*, 39(5), 807–815.

Adhikary, K. B., Park, C. B., Islam, M., & Rizvi, G. M. (2011). Effects of lubricant content on extrusion processing and mechanical properties of wood flour–high-density polyethylene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 24(2), 155–171.

Alemdar, A., & Sain, M. (2008). Biocomposites from wheat straw nanofibers: Morphology, thermal and mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 68(2), 557–565.

Andrusyk, L., Oporto, G. S., Gardner, D. J., & Neivandt, D. J. (2008). Wood plastic composites manufactured from hot water extracted wood: Mechanical evaluation. *Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology*.

Ashori, A., Matini-Behzad, H., & Tarmian, A. (2013). Effects of chemical preservative treatments on durability of wood flour/HDPE composites. *Composites Part B*, 47, 308–313.

Atar, İ., Karakuş, K., Başboğa, İ. H., Bozkurt, F., & Mengeloğlu, F. (2017). Investigation of effect of recycled PET flours in recycled polyvinyl chloride (PVC) composites. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(2), 81–88. <https://doi.org/10.17780/ksujes.302246>

Atar, İ., Başboğa, İ. H., Karakuş, K., & Mengeloğlu, F. (2021). Effect of waste tea (*Camellia sinensis*) wood fibers and MAPE on some properties of high density polyethylene (HDPE)

based polymer composites. *Turkish Journal of Forest Science*, 5(2), 606–619.

Atar, İ. (2024). Saponin kullanımının PP esaslı odun-plastik kompozitlerin fiziksel, mekanik ve yanma özellikleri üzerine etkisi. *Turkish Journal of Forestry*, 25(4), 483–493. <https://doi.org/10.18182/tjf.1494050>

Atar, İ. (2025). Effect of nanoscale carbon black, ammonium polyphosphate, and microcrystalline cellulose on properties of polypropylene composites. *BioResources*, 20(1), 994–1007. <https://doi.org/10.15376/biores.20.1.994-1007>

Ayrilmis, N., Jarusombuti, S., Fueangvivat, V., & Bauchongkol, P. (2011). Effect of thermal-treatment of wood fibres on properties of flat-pressed wood plastic composites. *Polymer Degradation and Stability*, 96(5), 818–822.

Bengtsson, M., & Oksman, K. (2006). Silane crosslinked wood plastic composites: Processing and properties. *Composites Science and Technology*, 66(13), 2177–2186.

Bledzki, A. K., & Faruk, O. (2005). Effects of chemical foaming agents and injection parameters on microcellular molded wood fiber/PP composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 97(3), 1090–1096.

Bledzki, A. K., & Faruk, O. (2006). Microcellular wood fibre reinforced PP composites: A comparative study. *International Polymer Processing*, 21(3), 256–262.

Bogoeva-Gaceva, G., Avella, M., Malinconico, M., Buzarovska, A., Grozdanov, A., Gentile, G., & ark. (2007). Natural fiber eco-composites. *Polymer Composites*, 28(1), 98–107.

Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V., & Sombatsompop, N. (2011). Structural and thermal stabilizations of PVC and wood/PVC

composites by metal stearates and organotin. *Bioresources*, 6(3), 3115–3131.

Chaochanchaikul, K., & Sombatsompop, N. (2011). Stabilization of PVC and wood/PVC composites by Tinuvin and TiO₂. *Polymer Engineering & Science*, 51(7), 1354–1365.

Chen, J. M., & Gardner, D. J. (2008). Dynamic mechanical properties of extruded nylon–wood composites. *Polymer Composites*, 29(4), 372–379.

Chotirat, L., Chaochanchaikul, K., & Sombatsompop, N. (2007). Adhesion mechanisms and interfacial strength in ABS/wood sawdust composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(8), 669–678.

Dányádi, L., Janecska, T., Szabó, Z., Nagy, G., Móczó, J., & Pukánszky, B. (2007). Wood flour filled PP composites: Compatibilization and adhesion. *Composites Science and Technology*, 67(13), 2838–2846.

Dányádi, L., Móczó, J., & Pukánszky, B. (2010). Effect of surface modifications of wood flour on properties of PP/wood composites. *Composites Part A*, 41(2), 199–206.

Dawson-Andoh, B., & Matuana, L. (2007). HDPE–wood flour composite lumber: Biocide efficacy. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 65(5), 331–334.

Durmaz, S., Aras, U., Avcı, E., Erdil, Y. Z., Atar, İ., & Kalaycıoğlu, H. (2023a). Influence of zinc oxide nanoparticles on flame resistance in wood plastic composites. *Drvna Industrija*, 74(4), 459–468. <https://doi.org/10.5552/drvind.2023.0132>

Durmaz, S., Aras, U., Avcı, E., Mengeloğlu, F., & Atar, İ. (2023b). The effect of chopped glass and carbon fiber reinforcement on physical, mechanical, and fire performance of wood plastic

composites. *Drewno*, 66(212). <https://doi.org/10.53502/wood-177638>

Durmaz, S., Özgenç Keleş, Ö., Aras, U., Avcı, E., & Atar, İ. (2024). Improvement of weathering and thermal resistance of wood-plastic composites with iron oxide nanoparticles. *Journal of Composite Materials*, 37(3). <https://doi.org/10.1177/08927057231191460>

Esper, A., Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2004). Water absorption in natural fibres and its influence on composites. *Composites Part A*, 35(11), 1267–1276.

Fabi, J. S., & McDonald, A. G. (2010). Effect of wood species on property and weathering performance of WPCs. *Composites Part A*, 41(10), 1434–1440.

Fabi, J. S., McDonald, A. G., Morrell, J. J., & Freitag, C. (2011). Effects of wood durability and chemical changes on fungal decayed WPCs. *Composites Part A*, 42(5), 501–510.

Forest Products Laboratory. (2010). *Wood handbook—wood as an engineering material* (GTR FPL-GTR-190).

Garcia, M., Hidalgo, J., Garmendia, I., & García-Jaca, J. (2009). WPCs with improved fire retardancy and durability. *Composites Part A*, 40(11), 1772–1776.

Gardner, D. J., Han, Y., & West, C. H. (2011). FRP-reinforced WPC panels for structural applications. 11th International Conference on Wood & Biofiber Plastic Composites.

Geng, Y., Li, K., & Simonsen, J. (2004). Compatibilizer effects on flexural properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 91(6), 3667–3672.

Geng, Y., Li, K., & Simonsen, J. (2005). Novel compatibilizer for wood–polyethylene composites. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19(11), 987–1001.

Gephardt, A. (2012). *Understanding additive manufacturing*. Hanser Publications.

Gordon, J. E. (1988). *The new science of strong materials*. Princeton University Press.

Gosselin, R., Rodrigue, D., & Riedl, B. (2006). Injection molding of postconsumer WPCs I: Morphology. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 19(6), 639–657.

Gosselin, R., Rodrigue, D., & Riedl, B. (2006). Injection molding of postconsumer WPCs II: Mechanical properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 19(6), 659–669.

Gregora, A., Hrabalova, M., Wimmer, R., Saake, B., & Altaner, C. (2009). PLA composites reinforced with spruce fibres. *Journal of Applied Polymer Science*, 114(5), 2616–2623.

Han, Y., & Gardner, D. J. (2010). Foamed styrene-based WPC using blowing agents. *10th International Conference on Wood and Biofiber Composites*, 27–35.

Hosseinaei, O., Wang, S., Enayati, A. A., & Rials, T. G. (2012). Effects of hemicellulose extraction on WPC properties. *Composites Part A*, 43(4), 686–694.

Ichazo, M., Albano, C., Gonzalez, J., Perera, R., & Candal, M. (2001). PP/wood flour composites: Treatments and properties. *Composite Structures*, 54(2), 207–214.

Jiang, H. H., & Kamdem, D. P. (2004). Development of PVC/wood composites: Literature review. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 10(2), 59–69.

Jiang, K., Guo, Y., & Bourell, D. L. (2013). Microstructure and binding mechanisms of SLS wood–plastic composites. <http://sffsymposium....>

Jonoobi, M., Harun, J., Mathew, A. P., & Oksman, K. (2010). Mechanical properties of CNF-reinforced PLA. *Composites Science and Technology*, 70(12), 1742–1747.

Kılıç, İ., Avcı, B., Atar, İ., Korkmaz, N., Yılmaz Güngör, G., & Mengeloğlu, F. (2024). Utilization of flours from hemp stalks as reinforcement in polypropylene matrix. *BioResources*, 19(1), 1494–1516. <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.1494-1516>

Kılıç, İ., Avcı, B., Atar, İ., Korkmaz, N., Yılmaz Güngör, G., & Mengeloğlu, F. (2023). Using furniture factory waste sawdust in wood-plastic composite production and prototype sample production. *BioResources*, 18, 7212–7229. <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.7212-7229>

Klyosov, A. A. (2007). *Wood–plastic composites*. Wiley.

Kumar, B., Zaidi, M. G. H., Rathore, S., Rai, A. K., Thakur, I. S., & Sah, P. L. (2006). Characterization of wood–PMMA composites. *Instrumentation Science & Technology*, 34(1–2), 67–83.

Kuo, P. Y., Wang, S. Y., Chen, J. H., Hsueh, H. C., & Tsai, M. J. (2009). Effects of material composition on injection-molded WPCs. *Materials & Design*, 30(9), 3489–3496.

Lauzon, M. (2013, August 22). Trex wins court approval to settle class action lawsuit. *Plastics News*.

Lee, S. H., & Ohkita, T. (2003). Mechanical and thermal flow properties of wood flour–biodegradable polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 90(7), 1900–1905.

Leitner, J., Hinterstoisser, B., Wastyn, M., Keckes, J., & Gindl, W. (2007). Sugar beet cellulose nanofibril composites. *Cellulose*, 14(5), 419–425.

Li, T., & Wolcott, M. (2006). Rheology of wood–plastic melts II: Lubricating systems. *Polymer Engineering and Science*, 46(4), 464–473.

Li, X., Tabil, L. G., & Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fibers. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), 25–33.

Mahfoudh, A., Cloutier, A., & Rodrigue, D. (2013). UHMWPE/wood composites via dry-blending. *Polymer Composites*, 34(4), 510–516.

Malainine, M. E., Mahrouz, M., & Dufresne, A. (2005). Thermoplastic nanocomposites from cactus cellulose. *Composites Science and Technology*, 65(10), 1520–1526.

Marathe, D. S., & Joshi, P. S. (2009). Highly filled wood flour–PVC composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 114(1), 90–96.

Mbarek, T. B., Robert, L., Sammouda, H., Charrier, B., Orteu, J. J., & Hugot, F. (2013). Effect of acetylation and additive on tensile properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(21), 1646–1655.

Morasch, J., & Stark, N. M. (2010). WPC durability. 10th International Conference on Wood & Biofiber Plastic Composites.

Muasher, M., & Sain, M. (2006). Effectiveness of photo stabilizers in WPC color protection. *Polymer Degradation and Stability*, 91(5), 1156–1165.

Oksman-Niska, K., & Sain, M. (2008). Wood–polymer composites. Woodhead Publishing.

Pelaez-Samaniego, M. R., Yadama, V., Lowell, E., Espinoza-Herrera, R. (2013). Wood thermal pretreatments for composites. *Wood Science and Technology*, 47(6), 1285–1319.

Peng, Y., Gallegos, S. A., Gardner, D. J., Han, Y., & Cai, Z. (2014). MAPP-modified CNF–PP composites. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.23235>

Poletto, M., Dettenborn, J., Zeni, M., & Zattera, A. J. (2011). EPS waste/wood flour composites. *Waste Management*, 31(4), 779–784.

Qiang, T., Yu, D., Gao, H. (2012). Wood flour/PLA biocomposites toughened with PHAs. *Journal of Applied Polymer Science*, 124(3), 1831–1839.

Rowell, R. M., & Konkol, P. (1987). Treatments that enhance physical properties of wood (FPL-GTR-55).

Schirp, A., & Wolcott, M. P. (2005). Fungal decay and moisture effects on WPCs. *Wood and Fiber Science*, 37(4), 643–652.

Segerholm, B. K., Ibach, R. E., & Wålinder, M. E. (2012). Moisture sorption in aged WPCs. *Bioresources*, 7(1), 1283–1293.

Shah, B. L., Selke, S. E., Walters, M. B., & Heiden, P. A. (2008). Effects of wood flour and chitosan on PLA. *Polymer Composites*, 29(6), 655–663.

Simonsen, J., Jacobsen, R., & Rowell, R. (1998). Wood-fiber reinforcement of SMA copolymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 68(10), 1567–1573.

Siró, I., & Plackett, D. (2010). Microfibrillated cellulose. *Cellulose*, 17(3), 459–494.

Stark, N. M., Matuana, L. M., & Mueller, S. A. (2009). Effect of fire retardants on heat release rate. 10th International Conference on Wood & Biofiber Plastic Composites.

URL:<https://mrswoodcraft.com/blog/what-is-wpc-material>

Wendel, B., Rietzel, D., Kühnlein, F., Feulner, R., Hülner, G., & Schmachtenberg, E. (2008). Additive processing of polymers. *Macromolecular Materials and Engineering*, 293(10), 799–809.

Wei, L. Q., McDonald, A. G., Freitag, C., & Morrell, J. J. (2013). Esterification effects on WPC durability. *Polymer Degradation and Stability*, 98, 1348–1360.

WPC patent list... (If needed APA'dan düzenlerim)

Xu, X., Liu, F., Jiang, L., Zhu, J., Haagensohn, D., & Wiesenborn, D. P. (2013). CNC vs. CNF: Microstructure and reinforcement comparison. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(8), 2999–3009.

Xie, Z., & Jin, L. (2014). Effect of plasticizer on acetylated wood flour–LDPE composites. *Future Energy, Environment and Materials*, 88, 229–236.

Zhang, H., Rizvi, G. M., & Park, C. B. (2004). HDPE/wood-fiber composite foams using CO₂. *Advances in Polymer Technology*, 23(4), 263–276. eğerli belgede kaynak yok.

BÖLÜM 3

AHŞAPTA ISIL İŞLEM UYGULAMALARI VE MALZEME ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ: GÜNCEL BİR BAKIŞ

Mustafa ÖNCEL¹
Alperen KAYMAKCI²

Giriş

Ahşap Malzemenin Doğası ve İyileştirme İhtiyacı

Düşük yoğunluğu, yüksek mekanik direnci, kolay işlenebilirliği ve sağladığı ısı-ses yalıtımı ile ahşap; estetik değeri yüksek ve kullanım alanı geniş bir yapı malzemesidir. Ancak organik ve yenilenebilir bir hammadde olan ahşap; higroskopik yapısı nedeniyle nem alışverişine bağlı boyutsal değişimler, mantar, böcek vb. karşı hassasiyet, çevresel faktörlerle bozunma ve yanıcılık gibi dezavantajlara sahiptir. Ahşabın bu zayıf yönlerini iyileştirmek ve performans özelliklerini geliştirmek amacıyla uygulanan üst yüzey işlemleri, ısıl işlemler ve kimyasal emprenye teknikleri gibi fiziksel, kimyasal, termal ve enzimatik müdahalelerin tümü, literatürde 'Ağaç

¹ Doktor Öğretim Üyesi, Kastamonu Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-5964-5119

² Profesör Doktor, Kastamonu Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-8009-7775

Malzeme Modifikasyon Yöntemleri' çatısı altında toplanmaktadır (Anonim, 2003) (Ayan, 2012) (Balıkçı, 2016) (Önduran, 2015) (Zor, 2011)

Ahşap malzemenin ısıtılması işlemi; 100°C ile 250°C sıcaklık aralığında, azot, normal atmosfer veya inert gaz ortamlarında gerçekleştirilen bir modifikasyon tekniğidir. Bu yöntem kimyasal modifikasyon ile kıyaslandığında; özel makine parkuru, teknik kurutma süreçleri ve karmaşık kalite kontrol prosedürlerine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmasıyla öne çıkmaktadır. Ayrıca, herhangi bir kimyasal madde girdisi gerektirmediği için, kimyasal modifikasyonun insan sağlığı ve çevre üzerinde yaratabileceği toksik riskleri de elimine etmektedir (Baydağ, 2014) (Çolak, 2014) (Esteves & Pereira, 2009).

Avrupa literatüründeki araştırmalar incelendiğinde; ısıtılması işlem uygulamalarının temel olarak sıcak hava, sıcak yağ, hidrotermal (sıcak buhar) ve hidrotermal (sıcak su) olmak üzere farklı ısı transfer ortamlarına dayanan yöntemlerle gerçekleştirildiği görülmektedir (Ayata, 2014) (Çolak, 2014) (Mıdıroğlu, 2015) (Önduran, 2015).

Isıtılması işlem metotları uygulamada eski ve yeni metotlar olarak iki gruba ayrılmıştır. Bunlardan eski metotlar; Staybwood ve Staypak'tır (Aytin, 2013).

Günümüzde endüstriyel ölçekte uygulanan modern ısıtılması işlem teknolojilerinde kullanılan başlıca yöntemler ise Finlandiya menşeli ve buhar tabanlı ThermoWood, Hollanda'da geliştirilen buhar-sıcak hava kombinasyonlu PlatoWood (Lignius/Lambowood), Fransa'da inert gaz atmosferinde uygulanan Retification (Retiwood/New Option Wood) ve Almanya'da sıcak yağ banyosu prensibine dayanan OHT (Hot Oil Treatment/Menz Holz) süreçleridir. Literatür incelendiğinde, bu teknikler arasında ticari ve bilimsel açıdan en baskın olanın ThermoWood olduğu ve konuyla ilgili çalışmaların büyük kısmının Finlandiya Teknik Araştırma Merkezi (VTT)

tarafından yürütüldüğü görülmektedir. Bu uygulamaların haricinde İsveç (Calignum), Rusya (Thermabolite), Avusturya (Huber Holz), Danimarka (WTT) ve ABD (Westwood) gibi ülkelerde de farklı ticari isimler altında ısıtma işlem uygulamaları mevcuttur (Aydemir & Gündüz, Ahşabın Fiziksel, Kimyasal, Mekaniksel ve Biyolojik Özellikleri Üzerine Isıyla Muamelenin Etkisi, 2009) (Aytin, 2013) (Korkut & Bakangil, Isıtma İşlem Metodları, 2007) (Mıdıroğlu, 2015) (Sundqvist, 2004) (Tjeerdsmas, 2006) (Yalınkılıç, 2013) (Zor, 2011).

Isıtma işlem görmüş kerestelerin kullanım yelpazesi değerlendirildiğinde; malzemenin inşaat ve dekorasyon sektöründe geniş bir uygulama alanına sahip olduğu görülmektedir. Dış mekan uygulamalarında; cephe kaplamaları, pencere doğramaları, panjurlar, bahçe mobilyaları, çitler ve çocuk oyun parkları öne çıkmaktadır. İç mekanlarda ise; parke, kapı, mobilya ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren sauna elemanları üretiminde tercih edilmektedir. Ayrıca, boyutsal kararlılık gerektiren müzik aleti yapımı da ısıtma işlemli ahşabın spesifik kullanım alanları arasında yer almaktadır (Çalıova, 2011) (Çolak, 2014) (Enjily & Jones, 2006) (Mayes & Oksanen, 2002) (Mıdıroğlu, 2015) (Özdemir & Arslan, 2011) (Tuncer, 2014) (Viitaniemi, 2000).

Isıtma işlem uygulaması sonucu ahşabın ana polimer bileşenleri olan hemiselüloz, selüloz ve ligninde geri dönüşümsüz termal bozunma meydana gelir, malzemenin biyolojik, kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinde kalıcı değişimler gözlemlenir (Alen, Kotilainen, & Zaman, 2002) (Balıkçı, 2016) (Boonstra M. J., 2008). Elde edilen bu modifiye ürün; değişken bağıl nem koşullarında işlem görmemiş ahşaba kıyasla daha yüksek bir higroskopik kararlılık sergilemekte ve termal yalıtım özelliklerinde iyileşme göstermektedir (Aydemir & Gündüz, Ahşabın Fiziksel, Kimyasal, Mekaniksel ve Biyolojik Özellikleri Üzerine Isıyla Muamelenin Etkisi, 2009) Ayrıca biyolojik zararlılara karşı direnç artar ve odundaki ekstraktif maddeler odundan uzaklaşır (Fengel & Wegener,

1989) (Yalınkılıç, 2013) (Viitanen, Jämsä, Paaanen, Nurmi, & Viitaniemi, 1994).

Odunda termal bozunma süreci bariz olarak 100°C itibariyle başlamakta olup; hedeflenen performans iyileştirmeleri, yaklaşık 150°C ve üzerindeki sıcaklıklarda elde edilmektedir. Sıcaklık artışıyla birlikte malzemenin rengi koyulaşmakta ve bünyesindeki ekstraktif maddeler uzaklaşmaktadır. Ancak kritik eşik olan 200°C aşıldığında; odun bileşenlerinin kimyasal dönüşüme uğraması ve gaz fazındaki degradasyon ürünlerinin açığa çıkmasıyla birlikte yapısal hasarlar meydana gelmeye başlar. Sıcaklığın 270°C'nin üzerine çıkması durumunda ise piroliz ve yanma reaksiyonları tetiklenir. Ayrıca, ısıtılma işlem sonrasında ahşabın higroskopisitesinde (nem alma isteği) gözlemlenen düşüş; işlem sırasında hidroksil gruplarında meydana gelen kademeli kayıpların doğrudan bir sonucudur (Viitanen, Jämsä, Paaanen, Nurmi, & Viitaniemi, 1994).

Hizmet ömrünü tamamlayan ısıtılmalı ahşap malzemelerin, enerji santrallerinde biyokütle yakıtı olarak değerlendirilmesi; fosil yakıtlara nazaran CO₂ emisyonlarını minimize ederek temiz enerji üretimine katkı sağlayan sürdürülebilir bir bertaraf yöntemidir (Ayata, 2014).

ThermoWood Yöntemi: Süreç ve Aşamalar

ThermoWood yöntemi Finlandiya'da Teknik Araştırma Merkezi (The Technical Research Centre of Finland) tarafından geliştirilmiş ve Finlandiya ThermoWood Derneği üyeleri tarafından lisanslı olarak kullanılmaktadır (Ayan, 2012) (Aytin, 2013) (Ayata, 2014) (Baltacı, 2010) (Çalıova, 2011) (Korkut & Kocaefe, 2009).

Thermowood ısıtılma işlem uygulaması yeni kesilmiş veya hava kurusu rutubetteki ağaç malzemelere 3 safhada olacak şekilde gerçekleştirilmektedir (Mayes & Oksanen, 2002) (Mıdıroğlu, 2015).

İlk safha, fırın sıcaklığının artırılması ve yüksek sıcaklıkta kurutma işlemlerini kapsar. Sıcaklık, ısı ve buhar kombinasyonu kullanılarak önce hızlıca 100°C'ye, ardından kademeli olarak 130°C'ye çıkarılır. Bu süreçte su buharı, yüzey çatlaklarını önleyici bir koruyucu olarak işlev görür. 14-30 saatlik bir periyotta gerçekleşen bu işlem sonucunda malzeme rutubeti %0'a kadar düşürülür. Buhar uygulamasının bir diğer avantajı ise oduna kazandırdığı elastikiyettir; bu sayede ahşap malzeme, konvansiyonel fırın kurutmasına oranla çatlama ve deformasyonlara karşı daha yüksek mukavemet sergiler (Akkuş, 2012) (Beram, 2015) (Tuncer, 2014).

ThermoWood sürecinin en uzun evresi olan birinci kademe toplam işlem enerjisinin %80'inin tüketildiği aşamadır. Ancak bu yüksek orana rağmen, tüketilen enerji miktarının klasik kereste kurutma yöntemlerinde harcanan enerjinin yalnızca %25'ine tekabül ettiği ve bu durumun yöntemi ekonomik açıdan oldukça avantajlı kıldığı belirtilmektedir (Aydemir, 2007). Yöntemin bir diğer önemli üstünlüğü ise süreç boyunca herhangi bir kimyasal maddeye ihtiyaç duyulmaması, işlemin sadece ısı ve su buharı kullanılarak gerçekleştirilmesidir (Çalıova, 2011) (Mayes & Oksanen, 2002).

Sürecin ikinci aşaması, asıl modifikasyonun gerçekleştiği ısıtıl işlem evresidir. Bu safhada fırın sıcaklığı; hedeflenen işlem sınıfına “Thermo-S (Stabilite) veya Thermo-D (Dayanıklılık)” bağlı olarak 185°C ile 215°C aralığına yükseltilir. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin tutuşma riskini elimine etmek amacıyla süreç, azot gibi inert gaz atmosferinde yürütülür. Bu kontrollü atmosfer, ahşabı korumanın yanı sıra kimyasal değişim reaksiyonları üzerinde de belirleyici bir rol oynar. Nihai ürünün kullanım amacına göre 0,4 ila 4 saat arasında değişen işlem süresince; malzemenin termal degradasyondan zarar görmemesi için ortama sürekli su buharı takviyesi yapılmaktadır (Beram, 2015) (Mayes & Oksanen, 2002).

EN 113 (1996) standardına göre Thermo S, nispeten dayanıklı sınıfına girmektedir. Ayrıca çürüme karşısında malzemenin var olan direnç özellikleri SINIF 3’te belirtilen şartları karşılamaktadır. Thermo D sınıfı incelendiğinde ise ahşap malzemeler dayanıklı sınıfına ayrılmaktadır. Çürümeye karşı doğal direnci “SINIF 1” gereksinimlerini karşılar (EN 113, 1996) (Akkuş, 2012) (Çalıova, 2011) (Mıdıroğlu, 2015).

Sürecin üçüncü ve nihai aşaması olan soğutma ve kondisyonlama evresi; malzeme ile dış ortam arasındaki yüksek sıcaklık farkından kaynaklanabilecek termal çatlakları önlemek amacıyla büyük bir hassasiyetle yürütülür. Bu fazda, su püskürtme sistemleri kullanılarak ahşabın sıcaklığı kontrollü bir şekilde 50-60⁰C aralığına düşürülürken, eş zamanlı olarak malzeme rutubeti %4-6 seviyesine ulaşana kadar yeniden kondisyonlama sağlanır. Ağaç türü, işlem sıcaklığı ve malzemenin kesit boyutlarına bağlı olarak 5 ila 15 saat süren bu aşama ile birlikte; ThermoWood işleminin toplam süresi yaklaşık 50-80 saat aralığında tamamlanmaktadır (Aydemir, Gökner (Abies bormülleriana Mattf.) ve Gürgen (Carpinus betulus L.) Odunlarının Bazı Fiziksel, Mekanik ve Teknolojik Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkisi, 2007) (Ayata, 2014) (Beram, 2015).

Tablo 1’de ise ThermoWood metodunun ağaç malzemenin özellikleri üzerine etkileri görülmektedir.

Tablo 1 ThermoWood metodunun ağaç malzemenin özellikleri üzerine etkileri

Özellik/Sınıf	İğne Yapraklı Ağaçlar (Çam ve Ladin)		Yapraklı Ağaçlar (Iroko, Dişbudak, Meşe, Kayın)	
	Thermo S	Thermo D	Thermo S	Thermo D
İşlem Sıcaklığı	190±3°C	212±3°C	185±3°C	200±3°C
Biyolojik Dayanıklılık	+	++	Nötr	+

Boyutsal Stabilite	+	++	+	+
Eğilme Direnci	Nötr	-	Nötr	-
Renk Koyulaşması	+	++	+	++

Kaynak: (Akkuş, 2012) (Zor, 2011)

Ayrıca, iğne yapraklı ağaç türleri ve yapraklı ağaç türleri için Thermo–S ve Thermo–D kullanım yerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2 İğne yapraklı ve yapraklı ağaçların kullanım yerleri

İğne Yapraklı Ağaçlar (Ladin, göknar vb.)	
Thermo S	Thermo D
Bina yapımı	Kaplamalarda
Duvar ve tavan panelleri	Dış birleştirmelerde
Yapı malzemesi	Dış cephe kaplamaları
İç cephe kaplamaları	İç ve dış kapı imalatı
Dış cephe kaplamaları	Park ve bahçe mobilyalarında
İç mekan mobilyaları	Pencere ve panjurlarda
Mutfak ve elbise dolabı	Havuz ve bahçe decklerinde
Bahçe mobilyası	Ses bariyerlerinde
Kapı ve pencere imalatı	Saunalarda, sauna erlemanlarında ve banyo kaplamalarında
Saunalarda ve sauna erlemanlarında	Gemi güvertelerinde
Çatılarda	Çatı şeritlerinde
Panjurlarda	Diğer dış ortam yapılarında
Kaplamalarda	
Yapraklı Ağaçlar (Kayın, meşe vb.)	
Thermo S	Thermo D
Duvar ve tavan panelleri	
İç cephe kaplamaları	Thermo S ile aynı kullanım alanlarında kullanılabilir. Tek farkının renginin daha koyu olduğu belirtilmiştir.
İç mekan mobilyaları	
Bahçe mobilyası	
Saunalarda ve sauna erlemanlarında	
Tavanlarda	
Yer kaplamalarında (Parke)	

Kaynak: (Akkuş, 2012) (Zor, 2011)

Thermowood yöntemine göre uygulanan ısı işlem sonrası, özellikle 50mm’den kalın olan örneklerde oluşan iç çatlaklar, bu endüstriyel proses için problem oluşturmaktadır (Tuncer, 2014).

Isıl İşlem Görmüş Odunda Meydana Gelen Değişiklikler

Yüksek sıcaklıklarda yapılan ısıtım işlem esnasında hemiselülozlar diğler bileşenler olan selüloz ve lignine kıyasla daha fazla bozunduğı kabul edilmektedir. Kimyasal yapıdaki değişimler yaklaşık olarak 150°C sıcaklıktan sonra başlamaktadır. Bu değişimler sıcaklığın artırılmasıyla birlikte sürekli olarak artma eğilimi göstererek devam etmektedir. Hidrolizin 150°C altındaki düşük sıcaklıklarda daha yavaş gerçekleşmesi ve 230°C'den sonra selülozun parçalanma reaksiyonlarının başlaması sebebiyle, ısıtım işlem uygulamasında 150-230°C'ler arası genellikle kullanılan sıcaklık aralığıdır (Tuncer, 2014).

Isıtım işlem uygulaması iğne yapraklı ve geniş yapraklı ağaçların hepsine uygulanabilir olmasına rağmen her ağaç türüne göre ayrı optimizasyonlar yapılması gereklidir. Isıtım işlem sırasında odunun kimyasal yapısı bozunmaya uğramakta, asetik ve formik asit başta olmak üzere az miktarda fenolik ve aromatik bileşikler ile ekstraktifler bozunma ürünleri olarak açığa çıkmaktadır. İşlem sırasında aynı zamanda ortama karbonmonoksit, karbondioksit ve metanol gazları yayılmaktadır (Mayes & Oksanen, 2002).

Isıtım işlemli malzemenin yüksek rutubet karşısında gösterdiği boyutsal stabilitesi normal odundan daha fazladır ve termal yalıtkanlığı çok iyidir. Isıtım işlem süresince odunun biyolojik direnci ve kararlılığı artarken özellikle 200°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda eğilme direnci başta olmak üzere odunun mekanik özelliklerinde ciddi oranlarda düşüşler meydana gelmektedir (Balıkçı, 2016) (Çalıova, 2011) (Ulucan, 2012).

Fiziksel Özellikler Üzerine Isıtım İşlemin Etkisi

Ahşap malzemelere uygulanan ısıtım işlemin birincil sonucu, denge rutubet miktarının düşürülmesidir. Bu durum, ahşabın higroskopik hareketliliğini (çalışmasını) sınırlayarak boyutsal stabilizasyon sağlar ve malzemenin dış ortam şartlarına

mukavemetini artırır. Isıl işlemin ahşap malzeme üzerindeki belirgin etkilerinden biri, permeabilitede (geçirgenlik) sağladığı artıştır. Bu yapısal değişim, boyama ve vernikleme gibi üst yüzey işlemlerinin performansını yükseltmekle kalmayıp; CCA (Bakır-Krom-Arsenik) ve CCB (Bakır-Krom-Bor) gibi koruyucu maddelerle gerçekleştirilen emprenye süreçlerini de önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır (Çalıova, 2011) (Çolak, 2014) (Enjily & Jones, 2006) (Mayes & Oksanen, 2002) (Mıdıroğlu, 2015) (Özdemir & Arslan, 2011) (Tuncer, 2014) (Viitaniemi, 2000).

Isıl işlem uygulanmış odunda yoğunluk azalma yönünde bir eğilim göstermektedir. Isıl işlem sıcaklığı ve süresinin artışıyla doğru orantılı olarak odunun hacmi bir miktar daralır, ağırlık kaybı artar, hacim daralmasına oranla ağırlık kaybı daha fazla olduğu için odunun yoğunluğunda azalma meydana gelir (Chang & Keith, 1978) (Çolak, 2014) (Esteves & Pereira, 2009) (Hill, 2006). Yoğunluktaki bu düşüş ve odun bileşenlerindeki termal degradasyon, malzemenin mekanik direnç değerlerini olumsuz etkilemektedir. Ancak literatür verileri, mutlak dirençteki azalmaya rağmen, malzemenin direnç-ağırlık oranındaki değişimin sınırlı kaldığını göstermektedir (Jamsa & Viitaniemi, 2001) (Yıldız, 2002).

Isıl işlem süreci optimum şartlarda gerçekleşmezse hücre çeperlerinde fazla oranlarda büzüşme gerçekleşebilir (Chang & Keith, 1978) (Millett & Gerhards, 1972) (Mıdıroğlu, 2015).

Değişik atmosferlerde ısıtıl işlem görmüş odunun sorpsiyon (bir maddenin diğerine fiziksel yada kimyasal olarak bağ yapması) davranışı incelendiğinde ısıtıl işlem uygulama süresi ve sıcaklığında meydana gelen artışla doğru orantılı olarak numunelerin sorpsiyon kapasitelerinin düştüğü belirlenmiş fakat numunelerde kütle kaybının %20'nin üzerine çıkması durumunda numunelerin sorpsiyon kapasitelerinde tekrar artış olduğu tespit edilmiştir (Schneider, 1973).

Isıl işlem uygulaması sonucunda oluşan direnç kayıpları sadece kütle kaybına ve tür özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ladinin kayına göre termal olarak daha stabil olduğu, ısıtıl işlem esnasında meydana gelen kütle kaybı değerlerinden gözlemlenebilmektedir (Bhuiyan, Hirai, & Sobue, 2001) (Baştuğ, 2010) (Zor, 2011).

Çam, ladin ve kayın odunu kullanılarak yapılan çalışmada, odun yapısının ısıtıl işlem sonrası daha poröz bir yapıya sahip olduğu ve boyuna yöndeki su absorpsiyonunun işlem görmemiş odundan çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Tuncer, 2014).

Isıl işlem uygulaması teğet ve radyal yüzeylerde önemli ölçüde çalışmayı azaltmaktadır. Isıl işlem uygulaması yapılmış keresteler işleme sırasında çarpılma dönme ve şişmeye maruz kalmadığından marangozculukta tercihi çok olan bir üründür (Mıdıroğlu, 2015).

Odunun Sertliği

Hemiselülozların bozunması ile birlikte kristalitlerin kalınlığı ve selülozun kristallik derecesinde artışlar meydana gelmektedir. Bu artışlar sonucunda ise odunun direnci ve sertliğinde azalmaların olduğu gözlemlenmiştir. Isıl işlem uygulamasının yumuşak bir şekilde uygulanması durumunda odunun rutubetinin azalması ve denge rutubet yüzdesinin düşmesi nedeniyle ahşap malzemenin sertlik değerinde az miktarda artış meydana gelebilmektedir (Bilgin, 2010) (Sefil, 2010).

Yüzey Pürüzlülüğü

Isıl işlem uygulaması sonrasında ağaç malzemenin yüzey pürüzlülüğü bir miktar azalmaktadır. Özellikle 160°C üzerindeki ısıtıl işlem sıcaklıklarında sıcaklık etkisi sonucunda ligninin termoplastikleşme özelliği ile birlikte malzeme yüzeylerinde

sıkılaşma veya yoğunluk artışı olabilmektedir (Çakıcıer, 2007) (Çolak, 2014).

Higroskopluktaki Değişim

Deney örneklerinin 60°C’den 200°C’ye değişen sıcaklıklarda 1 saat bekletilmesi sonucunda ısııl işlem sıcaklığında meydana gelen artışlarla orantılı olarak ıslanabilirlik oranını belirleyen odunun temas açısında da önemli derecede artışların olduğu gözlemlenmiştir. Temas açısındaki artış tutkalın odunun yapısına nüfusunu azaltır ve yapışma mekanizmasında zayıf bir adezyon direnci oluşumuna neden olur. Ek olarak, dūřük ısııl işlem sıcaklıklarında odunun ıslanabilirlik özelliklerinde meydana gelen değişimlerin odun yüzeyine lipofilik ekstraktif maddelerin taşınarak birikmesi sonucunda meydana geldiği ifade edilmektedir (Ulucan, 2012) (Repellin & Guyonnet, 2005).

Isıl işlem uygulanmış odunun yüzeyleri daha az polar bir yapıya dönüşür, su geçirimi azalır (Hill, 2006) (Yalınkılıç, 2013).

Odun karbonhidratlarında var olan serbest hidroksil gruplarının mevcudiyeti veya erişilebilirliği suyun odun içindeki adsorpsiyon ve desorpsiyonunda önemli rol oynamaktadır. Isıl işlem uygulanmış odunun hidroksil gruplarının azalması sonucunda kristalimsi selülozun genel yapıdaki oranının artması ayrıca, serbest hidroksil gruplarının suya erişebilirliği noktasında engel oluşturan lignin ağının çapraz bağlanması ile hücre çeperlerinin bağlı su miktarı azalmakta ve dolayısıyla odunun genişlemesi azalmaktadır. Isıl işlem uygulaması odunun denge rutubet miktarı (DRM)’nı açık bir biçimde düşürür (Akkuş, 2012) (Baydağ, 2014) (Esmer, 2015) (Hill, 2006) (Mayes & Oksanen, 2002) (Sefil, 2010).

Odunun direnç özellikleri üzerine bağlı suyun etkisi oldukça fazla ve önemlidir. Artan bağlı su miktarı hücre çeperinin organik polimerleri arasındaki hidrojen bağlarında azalışa neden olur veya bağ oluşumlarını engeller. Direnç özellikleri kovalent bağ ve polimer

içi hidrojen bağlarından oldukça fazla etkilenmektedir. Bu bağlamda; ısıtım işlem görmüş ahşabın higroskopisitesindeki azalma ve Lif Doygunluk Noktasında (LDN) meydana gelen düşüş, malzemenin direnç özellikleri üzerinde pozitif bir etki mekanizması oluşturmaktadır (Akkuş, 2012) (Balıkçı, 2016) (Esmer, 2015) (Nuopponen, 2005).

Isıtım işlem uygulaması sonucu gözlemlenen en dikkat çekici durumlardan birisi histerezin (ahşabın rutubet alıp verme esnasında sergilediği davranış) tipik sigmoid eğrileri korunurken higroskopisitenin (yapısına su absorbe etme eğilimi) azalmasıdır. Histerezin odun üzerindeki pozitif etkisi bağıl nemde meydana gelecek ufak değişikliklerin ısıtım işlem uygulanmış odunun rutubet içeriğinde anında bir değişim meydana getirmemesidir. Bu durum ısıtım işlem uygulanmış odunun boyutsal stabilitesine olumlu yönde katkıda bulunur (Boonstra M. J., 2008) (Nuopponen, 2005) (Özcan, 2011) (Viitanen, Jämsä, Paajanen, Nurmi, & Viitaniemi, 1994).

Tutkal Adezyon Özellikleri

Odun yüzeyinin yeterince yüksek sıcaklık ve uzun süre oksidasyona maruz kalması veya pirolizi sonucunda yüzey inaktivasyona uğrayabilir (Sernek, Comparative Analysis of Inactivated Wood Surfaces, 2002) (Yalınkılıç, 2013). Yüzeyin planyalanarak aktif yüzeye ulaşılması gerekmektedir.

Isıtım işlem uygulanmış ahşap malzemeler melamin-üre formaldehid (MUF), polivinilasetat (PVAc) ve metil difenil diizosiyanat (MDI) gibi yaygın kullanım alanı bulunan tutkallar ile problemle karşılaşılmadan yapıştırılabilmektedir. Isıtım işlem uygulaması sonucu numunelerin artan boyutsal stabilitesi tutkalların yapışma özellikleri üzerine olumlu bir etkiye sahiptir (Yalınkılıç, 2013).

Odun yüzeyinin düşük pH'ı melamin-formaldehit ve üreformaldehit gibi asit varlığında sertleşen amino reçinelerin

kimyasal reaksiyon hızlarında artışa neden olur (Ayrılmış & Winandy, 2009) (Follrich, Uller, & Gindl, 2006) (Sernek, Boonstra, Pizzi, Despres, & Gérardin, 2008).

Renk Üzerine Isıl İşlemin Etkisi

Estetik bir parametre olan ahşap rengi; ısıtılma sırasında gerçekleşen oksidatif ve hidrolitik reaksiyonlar neticesinde karakteristik bir koyulaşma gösterir. Özellikle yapraklı ağaç türlerinde görsel kaliteyi artıran bu durum, ahşabın ticari tercih edilebilirliğini yükseltmektedir (Çalıova, 2011) (Johansson, 2005). Ayrıca, renk değişiminin şiddeti; termal degradasyon düzeyi, kütle kaybı ve mekanik direnç değişimleri ile korelasyon gösterdiğinden, ısıtılma işlem kalitesinin belirlenmesinde önemli bir indikatör olarak değerlendirilmektedir (Akkuş, 2012) (Çolak, 2014) (Çakıcıer, 2007) (Johansson, 2005) (Nuopponen, 2005) (Önduran, 2015).

Ahşabın ısıtılma işlemi neticesinde ortaya çıkan renk değişimi (koyulaşma); büyük ölçüde hemiselülozların bozunması ve ekstraktif bileşenlerin modifikasyonu ile ilişkilendirilmektedir (Perçin, 2012).

İğne yapraklı ağaç odunlarında yaz odunu veya ilkbahar odunu oluşuna bağlı olarak odunun yoğunluğunda değişiklikler ve buna bağlı olarak da odunda renk tonu farklılıkları gözlemlenebilmektedir (Bekhta & Niemz, 2003) (Bourgois, Janin, & Guyonnet, 1991) (Mıdıroğlu, 2015).

Isıtılmalı odunun var olan doğal renginin dış ortamda bozulmamasının istendiği durumlarda malzemelere koruyucu üst yüzey uygulaması yapılmasının gerekli olduğu belirtilmiştir (Ayadi, Lejeune, Charrier, Charrier, & Merlin, 2003) (Balıkçı, 2016) (Syrjänen & Kangas, 2000). Isıtılma işlem sonucunda elde edilen renk tonu mor ötesi (UV) ışınlarına karşı dayanıklı değildir. Malzemelerin yüzeyleri kısa bir süre açık havada tutulduktan sonra yüzeyler işlem görmemiş odun gibi grileşmektedir (Hill, 2006).

Isı İletkenliğindeki Değişimler

Isıl işlem uygulamasında sıcaklığına bağlı olarak malzemelerin yoğunluğu azalmakta ve bu durum sonucunda ağaç malzeme içerisindeki boşluk yüzdesi artmaktadır. Artan bu boşluk yüzdesi malzemenin ısı iletkenlik özelliklerinde azalmaya sebep olmaktadır (Gu & Hunt, 2007).

Kimyasal Özellikler Üzerine Isıl İşlemin Etkisi

Ahşap malzemeler selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşmaktadır. Ayrıca, selüloz ve hemiselülozlar karbonhidrat yapısında olan maddelerdir (Mayes & Oksanen, 2002) (Özcan, 2011) (Perçin, 2012) (Sefil, 2010).

Hemiselülozlar çeşitli monosakkaritlerden oluşur selüloza kıyasla daha kısa bir zincir yapısı sergilemektedir. Isıl işlem boyunca değişiklikler ilk önce hemiselülozlarda sonrasında ise selülozlarda meydana gelmektedir. Ancak değişimlerin çoğunun yüksek oksijen içerdiğinden dolayı hemiselülozlarda olduğu gözlemlenmiştir. Isıl işlem uygulaması sonrasında mantarların ana besin maddesi olan hemiselülozların yüzdesi ahşap malzeme içerisinde azalmıştır. Bu duruma bağlı olarak ısı ışılemlili ahşap malzemedede mantar gelişimi zorlaşır, yavaşlar ve odunun çürüme mukavemeti normal fırında kurutulmuş oduna kıyasla artış gösterir. Yapraklı ağaçlar incelendiğinde yapraklı ağaçlardaki hemiselüloz miktarı i ne yapraklı ağaçlara kıyasla daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Bu sebeple yapraklı ağaçlar i ne yapraklı ağaçlara kıyasla daha kolay degradasyona uğramaktadırlar (Bayda , 2014) (Sefil, 2010).

Hemiselüloz zincirlerinin parçalanması sonucunda odunda yaşanan direnç kayıpları selüloz zincirlerinin parçalanması sonucunda yaşanan direnç kayıplarına kıyasla oldukça düşük miktarlardadır (Bayda , 2014) ( alıova, 2011) ( zcan, 2011).

Isıl işlem uygulaması yapılmış geniş yapraklı ağaçlarda genellikle iğne yapraklı ağaçlardan daha fazla kütle kaybı olduğu gözlemlenmiştir. Geniş yapraklı ağaçların hemiselüloz birimi olan pentozlar, iğne yapraklı ağaç hemiselüloz birimi olan heksozanlara kıyasla bozunmaya karşı daha meyilli bir yapıdadırlar (Feist & Sell, 1987). Ayrıca, geniş yapraklı ağaçların yapılarında daha fazla sayıda asetil grupları bulundurmaları pentozların daha çabuk bozunmasına etki ettikleri tahmin edilmektedir (Esmer, 2015) (Hillis, 1975).

250°C'nin altında uygulanan ısıtma işlemde selüloz degradasyonu su buharı, karbondioksit gibi atmosferler altında yapılması durumunda selülozun amorf bölgeleri iyileşerek daha stabil yapıda kristalin bölgeler oluşumunu sağlamaktadır. Ek olarak, 200°C'de vakum ortamında ısıtma işlem uygulanmış ahşap malzemenin selüloz kristalitlerinin arttığı tespit edilmiştir (Çolak, 2014) (Fengel & Wegener, 1989).

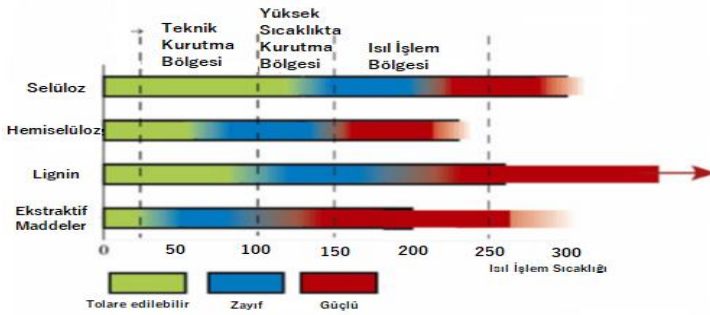
Lignin fenil propan ünitelerinden meydana gelmektedir. İğne yapraklı ağaç lignini guayasil fenil propan ünitelerinden oluşurken yapraklı ağaç lignini hemen hemen eşit oranda bulunan guayasil ve Siringil fenil propan ünitelerinden meydana gelmektedir (Baydağ, 2014) (Çaliova, 2011).

Hücre duvarı katmanlarındaki lignin dağılımı incelendiğinde; orta lamelin %60, sekonder çeperde bulunan S1 ve S2 tabakalarının ise %27-30 oranında lignin içerdiği görülmektedir. Ahşabın ana bileşenleri arasında termal degradasyona karşı en yüksek direnci sergileyen lignin; 200°C sıcaklık eşiği aşılmadığı sürece kütle kaybına uğramaz ve yapısındaki beta-aril-eter bağlarını korur. Isıl işlem sürecinde lignin, eş zamanlı olarak hem degradasyon hem de polimerizasyon reaksiyonlarına maruz kalır. Ayrıca, lignin-hemiselüloz kompleksindeki kovalent bağların kırılması neticesinde, yüksek reaktiviteye sahip ve düşük molekül ağırlıklı lignin fragmanları açığa çıkmaktadır (Ayata, 2014).

200°C ile 250°C arasında lignin yapısından CO₂ ve diğer bileşikler ayrılmaktadır. 250°C ile 400°C arasında ise polimerleşme eğilimli fenolik ve nötral yağlar üretilir. Ligninin ısıl bozunma sıcaklığı yaklaşık 270°C’de ekzotermik (ısı veren) bir şekilde başlar. Lignin içeriğinde yaşanan önemli reaksiyonların 280°C ve daha yukarısında bulunan sıcaklıklarda meydana geldiği belirtilmiş, lignin yapısında meydana gelen değişimler sonucunda ligninin metoksil içeriğinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir (Aytin, 2013) (Zor, 2011).

Isıl işlem uygulaması sonucunda ahşap malzemelerin ana bileşiklerinde meydana gelen değişimler Grafik 1’de görülmektedir.

Grafik 1 Ahşap malzemelerin ana bileşiklerinde meydana gelen değişimler



Kaynak: (Perçin, 2012)

Su yada buhar ile birlikte ahşap malzemelerin ısıtılması asetik asit gibi organik asitlerin oluşumunu hızlandırmakta, bu durum hemiselülozların hidrolizine ve amorf yapıdaki selülozun daha küçük boyutlara ayrılmasına yol açmaktadır. Fakat ısıl işlem süresince fırına su buharı takviyesi yapılmasının ısıl işlem kaynaklı oksidatif oluşumları engelleyebileceği ifade edilmektedir (Bourgeois, Janin, & Guyonnet, 1991) (Garrote, Domínguez, & Parajó, 1999) (Özcan, 2011) (Zor, 2011).

Anatomik Özellikler Üzerine Isıl İşlemin Etkisi

150°C’de ısıtıl işlem uygulanmış ladin odunu elektron mikroskopuyla incelenmiş ve hücre çeperlerinin S1 ve S2 tabakaları arasında ve hücre köşelerinde çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada ise 180-200°C’de işlem görmüş ladin odununda hücrelerin orta lamellerinde ve sekonder çeperin S1 tabakasında çatlaklar oluştuğu tespit edilmiştir. Bu çatlaklara ilaveten geçitlerdeki torus depo maddelerinin çözülmesi gibi değişiklikler meydana gelmiştir. Diğer bir çalışmada sarıçam odununa uygulanan ısıtıl işlem uygulaması sonucunda hücre boyutlarında önemli bir değişim olmadığı görülmüş, hücre lümenlerinin genişlediği belirlenmiş ve bu durumun hücre çeper bileşenlerinin uzaklaşmasıyla ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Isıl işlem uygulaması yapılmış sarıçam odunu X ışını uygulaması altında incelemiş, hücrelerin mikrofibril açılarında bir değişiklik olmadığı, fakat hücre çeperleri porozitesinin arttığı tespit edilmiştir. Isıl işlemli çam diri odununda karşılaşma yeri geçitlerinin taze odununkinden daha açık yapıda olduğu, pencere tipi geçitlerin gevşek bir yapı kazandığı veya tamamen parçalandığı, zarar görmemiş yıllık halka sınırlarında ise kenarlı geçitlerin aspirasyona uğradıkları veya deforme oldukları görülmüştür. Diri odunda bulunan kenarlı geçitlerinde oluşan açılma öz odunda gözlemlenmemiştir (Tuncer, 2014).

Mekanik Özellikler Üzerine Isıl İşlemin Etkisi

Odunun direnç özellikleri ile ilgili en önemli unsur sıcaklıktır. Odun sıcaklığının sıfırın altında -200°C’den +160°C’ye çıkartılması durumunda odunun direnç özelliklerinde lineer bir azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Oduna sıcaklık uygulaması sonucu odun üzerinde sıcaklık etkisi ile oluşan ani etkiler ve termal degradasyon sonucu oluşan kalıcı etkiler meydana gelmektedir. Ani etkilerin geri dönüşü mümkündür fakat kalıcı etkilerin geri dönüşümü mümkün olmamaktadır. Ani ve kalıcı

etkilerin birleşimi ahşap malzemenin direnç özellikleri üzerinde daha fazla zarar meydana getirmektedir (Baştuğ, 2010).

40–50°C'nin altındaki ısıtım sıcaklıklarında degradasyon oluşma yüzdesinin çok az olması sebebiyle bu degradasyon ihmal edilebilmektedir. Ayrıca, ısıtım sıcaklığının 200°C'nin üzerine çıkması odunun direnç özelliklerinde, yüzey kabalığında ve aşınma direncinde ciddi azalmaya sebep olmakta, bu azalmaların ısıtım sıcaklığının 200°C'nin altındaki sıcaklıklarda tutulması durumunda minimum seviyelere düşürülebileceği belirtilmektedir (Zor, 2011).

Isıtım işlemli malzemelerin eğilme direncinde meydana gelen düşüşün genellikle 220°C'den yüksek ısıtım sıcaklıklarında başladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, eğilme direncindeki bu düşüşün odunun elastikiyet modülü üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir (Baştuğ, 2010) (Baydağ, 2014) (Çalıova, 2011).

Isıtım işlem sürecinde, hem malzemenin iç yapısında hem de yüzeylerinde gelişen çatlak ve yarık gibi deformasyonlar; ahşabın mekanik özelliklerinde ciddi mukavemet kayıplarına yol açmaktadır. Ayrıca, termal degradasyona bağlı kütle kaybı ve buna paralel olarak yoğunlukta meydana gelen düşüşlerde mekanik performansı olumsuz etkileyen diğer önemli faktörlerdir (Güler, 2010) (Repellin & Guyonnet, 2005) (Ulucan, 2012).

Ağaç türü ve ısıtım işlem uygulama şartları dikkate alınmadan elastikiyet modülünde meydana gelen kayıplar incelendiğinde kütle kaybının %8'i geçmesi durumunda malzemenin elastikiyet modülü değerinde anlamlı derecede bir azalış gözlemlenmiştir (Özcan, 2011) (Tuncer, 2014).

Lignin-hemiselüloz matriksi içerisinde ısıtım işlem uygulaması esnasında hemiselülozun yan zincirlerinin kırılması sonucu ahşap malzemenin yük dağıtım kapasitesinin bozulduğu ve bu sebeple bu durumun ahşapta yaşanan direnç kayıplarından sorumlu tutulabileceği ifade edilmiştir. Diğer bir sebep olarak ise

hemiselülozun omurga yapısının bozulması sonucunda hemiselülozun polimerizasyon derecesinin azalması görülmektedir (Aytin, 2013).

Isıl işlemli ahşap malzemeler taşıyıcı amaçlı olarak kullanılması arzulandığı takdirde yoğunluğu yüksek ve yıllık halkaları daha sık yapıdaki ahşap malzemelerin tercih edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Mıdıroğlu, 2015).

Isıl işlemli malzemelerin mekanik özellikleri üzerine malzemelerin lignin içeriklerinin direkt olarak etki edip etmediği konusunda net bir görüş bulunamamıştır. Lignin selüloz mikrofibril ve fibrillerinin rijidite çubuğu olarak davranmakta ve artan çapraz bağlantılar liflere dik hareketleri kısıtlamakta veya önlemektedir. Ayrıca, lignin orta lameli oluşturan ana bileşendir. Isıl işlem uygulaması sonucu lignin polimer ağında bulunan çapraz bağlardaki artış sonucunda orta lamelin direncinde artış meydana gelmekte ve bu durum hücre çeperlerinin direnç özellikleri üzerine olumlu bir şekilde etki etmektedir. Bu bağlamda lignin polimer ağının ahşap malzemelerin direnç özellikleri üzerine doğrudan bir etkisi olduğu sonucuna varılabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, başka bir çalışmada lignin polimer ağı içindeki düzenli yapının odunun direnç özellikleri üzerine olumlu derecede etki ettiği tespit edilmiştir (Aytin, 2013).

Isıl işlem görmüş ahşap malzemelerin mekanik performansı incelendiğinde; liflere paralel basınç direnci ve sertlik değerlerinde artış kaydedilirken, makaslama ve özellikle liflere paralel çekme direncinde belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. Basınç, çekme ve makaslama gerilmelerinin kompleks bir kombinasyonu olan eğilme direncinde ise; çekme direncindeki kadar dramatik oranlarda olmasa da, istatistiksel olarak anlamlı ve kayda değer bir düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Dinamik eğilme (şok) direnci ise liflere paralel çekme direncinden çok daha fazla bir azalış göstermiştir. Bu direnç özelliklerinde meydana gelen azalış ağaç türü ve ısıtma işlem koşullarına göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca malzemelerin

elastikiyet modülü değerlerinde bir miktar artma yaşandığı tespit edilmiştir. Isıl işlemli malzemelerin mekanik özellikleri üzerine ligninin polikondenzasyon reaksiyonları, amorf selülozun kristalleşmesi-bozunması ve hemiselülozun modifikasyonu-bozunması etkili olmaktadır (Boonstra M. J., 2008) (Korkut & Kocaefe, 2009).

Literatürde, ısıl işlem sonrası ahşap malzemenin çekme dayanımında düşüşler yaşandığı ve yük altında sünek davranış yerine ani (gevrek) kırılma eğilimi gösterdiği rapor edilmiştir. Bu nedenle, ısıl işlemli ahşabın taşıyıcı eleman olarak kullanılması durumunda, statik hesaplamaların bu mukavemet kayıpları gözetilerek titizlikle yapılması elzemdir. Buna karşın; işlem sonrasında basınç direnci, yüzey sertliği ve rijitlik gibi mekanik özelliklerde sağlanan iyileşmeler, malzemenin bu niteliklerin talep edildiği alanlarda kullanımını avantajlı kılmaktadır (Çalıova, 2011) (Çolak, 2014) (Enjily & Jones, 2006) (Mayes & Oksanen, 2002) (Mıdıroğlu, 2015) (Özdemir & Arslan, 2011) (Tuncer, 2014) (Viitaniemi, 2000).

150°C-200°C arasında farklı süreler boyunca uygulanan ısıl işlem sonucu şok direncinde %50'ye varan azalışlar tespit edilmiş, 210°C'de havasız ortamda ibreli ağaç odununa uygulanan ısıl işlem sonucu eğilme direncinde %2, sertlikte %5 azalma olduğu gözlemlenmiştir (Esmer, 2015).

Eğilme direncinde meydana gelen kayıplardan ilk olarak hemiselülozun modifikasyonu veya bozunması sorumlu tutulmaktadır. Ayrıca selülozun amorf bölgelerinin kristalleşmesi de diğer bir başlıca sebep olarak görülmektedir. Ahşap malzemede liflere dik basınç direncinde liflere paralel basınç direncine kıyasla meydana gelen azalışın ise kristal selülozun anizotropik (üç yönde farklı özellik sergilemesi) yapısından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ek olarak denge rutubet miktarında meydana gelen azalışın malzemenin mekanik özelliklerinde bir artış sağladığı belirtilmiş

ancak bu artışın polimerlerde meydana gelen bozunma sonucunda kaybedildiği ifade edilmiştir (Çolak, 2014) (Esmer, 2015) (Özcan, 2011).

Ayrıca, ısıtma işlemi uygulama sıcaklığı ve süresinde meydana gelen artışlara bağlı olarak eğilme direncinde meydana gelen azalış hızında artış yaşandığı tespit edilmiştir (Mıdıroğlu, 2015) (Yalınkılıç, 2013).

Elastikiyet modülünde (MOE) gözlenen artış; hemiselülozun termal degradasyonu, lignin-hemiselüloz matriksinin yük aktarım kapasitesindeki değişim ve kristalin selüloz oranının toplam kütleye kıyasla nispi artışı ile ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, lignin polimer ağında meydana gelen çapraz bağlanma artışının da bu sürece katkı sağladığı düşünülmektedir. Ek olarak; hücre duvarındaki bağlı su miktarının azalması ve düşen higroskopisite, malzemenin esnekliğini (plastisitesini) azaltarak rijitliğini artırmakta, bu durum ise elastikiyet modülünde yükselme ile sonuçlanmaktadır (Baydağ, 2014) (Boonstra M. J., 2008) (Çalıova, 2011) (Ulucan, 2012).

Farklı ağaç türleri odunlarından elde edilmiş numunelere 160°C sıcaklıkta hava atmosferi altında farklı süreler boyunca ısıtma işlemi uygulanması yapılmıştır. Isıtma işlemi uygulamasının ilk zamanlarında eğilme direncinde artış meydana geldiği görülmüş ilerleyen zamanda ise eğilme direncinde azalma olduğu gözlemlenmiştir (Aydemir, Gökner (*Abies bormülleriana* Mattf.) ve Gürgeç (*Carpinus betulus* L.) Odunlarının Bazı Fiziksel, Mekanik ve Teknolojik Özellikleri Üzerine Isıtma İşleminin Etkisi, 2007).

Kayın ve çam diri odunlarına değişik sıcaklık ve sürelerde ısıtma işlemi uygulanmış ve 150°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda eğilme direnci, elastikiyet modülü, basınç ve şok dirençlerinde önemli derecede bir düşüşün olduğu gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada rutubetli atmosfer altında 150°C sıcaklıkta kapalı bir sistemde ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin elastikiyet modülünde azalma tespit

edilmiş ve bu azalmanın belirli bir şablon izlemediği ifade edilmiştir (Baştuğ, 2010) (Ulucan, 2012). Termal modifikasyon işlemi uygulanmış odun normal odun ile karşılaştırıldığında daha gevrek bir yapı sergilediği tespit edilmiştir (Baştuğ, 2010).

8 saat süre ile 180⁰C, 200⁰C ve 220⁰C sıcaklıklarda ısıtıl işlem uygulaması yapılmış japon sediri örneklerinin eğilme direncinde sırası ile %20, %45 ve %80 oranında azalış, elastikiyet modülünde ise 180⁰C ve 200⁰C sıcaklıklarda az bir artış, 180⁰C’de 20 saat, 200⁰C’de 8 saat işlem gören örneklerde %10 azalış, 220⁰C’de 8 saat işlem gören örneklerde ise %60 azalış gözlemlenmiştir. Ayrıca, 220⁰C’de işlem gören sarıçamın eğilme direncinde %47, ladinin eğilme direncinde %50 azalış, elastikiyet modülünde ise yalnızca %3,5 azalış yaşandığı ifade edilmiştir (Esmer, 2015).

Isıl işlemlili malzemelerde basınç direnci teğet yönde az miktarda artma, radyal yönde azalma gösterirken boyuna yönde önemli miktarda artış göstermektedir. Isıl işlem uygulaması sonucu amorf selülozun bozunması ve/veya kristalleşmesi yüksek derecede düzenli kristalimsi selüloz miktarını arttırmaktadır. Kristalimsi yapıdaki selüloz zinciri anizotropik bir yapı göstermektedir ve rijit yapısı odunda boyuna yönde basınç direncinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, lignin polimer ağının çapraz bağlarında meydana gelen artışlar ve odundaki bağlı su miktarında meydana gelen azalmalar boyuna yönde basınç direncinde artışlar olmasına neden olmaktadır. Isıl işlemlili odunun radyal yöndeki basınç direncinde meydana gelen azalışlar ufak radyal çatlaklardan kaynaklanabilir (Baydağ, 2014) (Çalıova, 2011) (Ulucan, 2012).

Isıl işlem uygulaması, amorf selülozun az miktarda fakat dikkate değer bozunmasına neden olmaktadır. Bu durum ısıtıl işlemlili odunun çekme direncinin azalmasıdaki ana sebeplerden birisidir (Çalıova, 2011) (Ulucan, 2012). Çekme direncindeki azalmalardan amorf selülozda meydana gelen kristalleşmenin etki edip etmediği tam olarak bilinmemektedir. Kristalimsi selüloz aşırı düzenli ve rijit

yapısı nedeniyle amorf selüloza kıyasla daha kırılğan ve daha esnek bir yapı sergilemektedir. Bu sebeple kristalimsi selüloz miktarında yaşanacak bir artış malzemelerin çekme direnci üzerine olumsuz yönde bir etki edecektir. Isıl işlem sonucu lignin yapısında meydana gelen değişimlerin çekme direncini azaltıcı yönde bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir (Poncsak, Kocaefe, Bouazara, & Pichette, 2006).

Isıl işlem sonucunda makaslama direncinde meydana gelen azalışın orta lamelin %20'sini oluşturan polyozların furfural polimerlerine kısmi olarak dönüşmesinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, hemiselülozun bozunması selüloz mikrofibril ve/veya fibrillerinin yük paylaşım kapasitesinde azalma meydana getirmekte ve bu durum malzemelerin makaslama direncinde de azalmalara neden olmaktadır. Ancak, lignin polimer ağı içerisindeki çapraz bağlanmalarda meydana gelen artışlar sonucunda ve ligninin orta lameli oluşturan ana bileşen olması itibariyle malzemelerin makaslama dirençlerinde artış meydana gelmektedir (Stamm, 1964) (Ulucan, 2012).

Şok direncinin azalmasında ana sorumlu olarak hemiselüloz bozunması görülmektedir. Selüloz ve hemiselüloz arasındaki etkileşim ikincil bağlara dayanmaktadır ve bu durumun sonucu olarak şok direncini ikincil bağlar belirlemektedir. Ayrıca, hemiselüloz ile lignin arasındaki kovalent bağların kırılması ve selüloz mikrofibril/fibrilleri içindeki kovalent bağların kırılması şok direncinde önemli bir azalmaya neden olmaktadır. Bu duruma ek olarak amorf selülozun kristalleşmesi ve/veya bozunması sonucunda kristalimsi selüloz miktarındaki artış kırılğanlığı arttırarak malzemelerin şok direncinde azalışlara neden olur (Aytin, 2013).

Sonuç

Isıl işlem görmüş ahşap; dış cephe kaplamaları, deck (zemin) uygulamaları, sauna elemanları, bahçe mobilyaları, pencere doğramaları ve müzik aletleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır Taşıyıcı sistemlerde kullanımı, mekanik direnç kayıpları nedeniyle dikkatli hesaplama gerektirir (Çalıova, 2011) (Çolak, 2014) (Enjily & Jones, 2006) (Mayes & Oksanen, 2002) (Mıdıroğlu, 2015) (Özdemir & Arslan, 2011) (Tuncer, 2014) (Viitaniemi, 2000).

Sonuç olarak, ısıt işlem; ahşabın dayanıklılığını ve stabilitesini artıran, kimyasal içermeyen etkili bir yöntemdir. Renk değişimi ve yüzey kalitesindeki artış estetik değer katarken, mekanik özelliklerdeki değişimler kullanım alanının doğru seçilmesini zorunlu kılar.

Kaynakça

- Akkuş, M. (2012). *Renk Açma İşleminin Termal Modifikasyon Yapılmış Bazı Ağaç Malzemelere Etkisi*. Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Alen, R., Kotilainen, R., & Zaman, A. (2002). Thermo Chemical Behavior of Norway Spruce (*Picea abies*) at 180-225 oC. *Wood Science and Technology*, 36 (s. 163-171). içinde
- Anonim. (2003). *Thermowood Handbook. Finnish Thermowood Association, Helsinki, Finland*. içinde
- Ayadi, N., Lejeune, F., Charrier, F., Charrier, B., & Merlin, A. (2003). Color Stability of Heat Treated Wood During Artificial Weathering. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61(3).
- Ayan, S. (2012). Isıl İşlemlili Ahşap Lamine Panellerin Akustik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya Dekorasyon Eğitimi ABD, Doktora Tezi*. içinde
- Ayata, Ü. (2014). *Isıl İşlem Görmüş (Thermowood) Bazı Ağaç Türlerinde Kullanılan Su-Bazlı Vernik Katmanlarının Hızlandırılmış UV Yaşlandırma Etkisine Karşı Direncinin Belirlenmesi*. Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Aydemir, D. (2007). *Gökmar (Abies bormülleriana Mattf.) ve Gürgen (Carpinus betulus L.) Odunlarının Bazı Fiziksel, Mekanik ve Teknolojik Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkisi*. Z.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Aydemir, D., & Gündüz, G. (2009). Ahşabın Fiziksel, Kimyasal, Mekaniksel ve Biyolojik Özellikleri Üzerine Isıyla

Muamelenin Etkisi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 11 (15), 71-81.

Ayrılmış, N., & Winandy, J. (2009). Effects of Post Heat-Treatment on Surface Characteristics and Adhesive Bonding Performance of Medium Density Fiberboard. *Materials and Manufacturing Processes* 24(5), 594-599.

Aytin, A. (2013). *Yabani Kiraz (Cerasus avium (L.) Monench) Odununun Fiziksel, Mekanik ve Teknolojik Özellikleri Üzerine Yüksek Sıcaklık Uygulamasının Etkisi*. Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

Balıkçı, E. (2016). Isıl İşlem Görmüş Ağaç Malzeme ile Hazırlanan Çerçeve Konstrüksiyonlu Mobilya Birleştirmelerinin Mekanik Özellikleri. *Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*. içinde

Baltacı, S. (2010). *Bazı Odunların Çivi ve Vida Tutma Direnci Üzerine Isıl İşlem Uygulamasının Etkisi*. Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Baştuğ, İ. (2010). Isıl İşleme Maruz Bırakılan Lamine Ağaç Malzemenin Bazı Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Baydağ, M. (2014). Isıl İşlem ve Hızlı Yaşlandırma Uygulanmış Ağaç Malzemenin Dielektrik Özellikleri. *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*. içinde

Bekhta, P., & Niemz, P. (2003). *Effect of High Temperature on the Change In Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce Wood*. *Holzforschung*.

- Beram, A. (2015). *Isıl İşlem Görmüş Ağaç Malzemenin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi: İroko Örneği*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Bhuiyan, M., Hirai, N., & Sobue, N. (2001). Effect of Intermittent Heat Treatment on Crystallinity in Wood Cellulose. *Journal of Wood Science*, 47(5), 336-341.
- Bilgin, Y. (2010). *Türkiye’de Masif Panel Sektörünün Yapısal Durumu ve Ağaç İşleri Endüstrisindeki Kullanım Olanakları*. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Boonstra, M. J. (2008). *A Two-Stage Thermal Modification of Wood*. Nancy-Fransa: Ghent University and Université Henry Poincaré, Ph.D. dissertation in supervision.
- Bourgois, J., Janin, G., & Guyonnet, R. (1991). Measuring Colour: A Method of Studying and Optimising the Chemical Transformations of Thermally-Treated Wood. *Holzforschung*, 45(5).
- Chang, C. I., & Keith, C. T. (1978). Properties of Heat-darkened Wood. II – Mechanical Properties and Glueability. Canada: Ottawa: Eastern Forest Products Laboratory, FPL Report OPX214E.
- Çakıcıer, N. (2007). *Ağaç Malzeme Yüzey İşlemi Katmanlarında Yaşlanma Sonucu Belirlenen Değişiklikler*. İstanbul Üniversitesi Doktora Tezi.
- Çalhova, Z. (2011). *Kızılâğaç ve Doğu Ladini Odunlarının Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkisi*. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya Dekorasyon Eğitimi ABD, Yüksek Lisans Tezi.

- Çolak, G. (2014). Isıl İşlemin (Thermowood Yöntemi) Bazı Ağaç Türlerinin Fiziksel Özellikleri, Çürüklük ve Hava Koşullarına Karşı Dayanıklılığı Üzerine Etkileri. *Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.* içinde
- EN 113. (1996). *Wood Preservatives-Test Method for Determining the Protective Effectiveness Against Wood Destroying Basidiomycetes - Determination of the Toxic Values.* European Standart.
- Enjily, V., & Jones, D. (2006). The potential for Modified Materials In The Panel Products Industry. *Wood Resources and Panel Properties Conference* (s. 12-14). Valencia, Spain: COST Action E44/E49.
- Esmer, M. (2015). *Isıl İşlem Görmüş Ağaç Malzemede Vernik Yapışma Direnci.* Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Esteves, B., & Pereira, H. (2009). Wood Modification by Heat Treatment A Review. *Bioresources*, 4 (1), 370-404.
- Feist, W., & Sell, J. (1987). Weathering Behaviour of Dimensionally Stabilized Wood By Heating Under Pressure of Nitrogen Gas. *Wood and Fiber Science*, 19(2).
- Fengel, D., & Wegener, G. (1989). Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin /New York: Walter De Gruyter 3(9).
- Follrich, J., Uller, U., & Gindl, W. (2006). Effects of Thermal Modification on the Adhesion between Spruce Wood (*Picea abies* Karst.) and a Thermoplastic Polymer. *Holz als Roh und Werkstoff*, 64, 373-376.

- Garrote, G., Domínguez, H., & Parajó, J. (1999). Hydrothermal Processing of Lignocellulosic Materials. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57(3).
- Gu, H., & Hunt, J. (2007). Two-Dimensional Finite Element Heat Transfer Model of Softwood. Part III. Effect of Moisture Content on Thermal Conductivity. *Wood and Fiber Science*, 39 (1).
- Güler, F. (2010). *Bazı Ağaç Türlerinde Isıl İşlem Uygulamasının Vernik Katman Özellikleri Üzerine Etkisi*. Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Hill, C. (2006). Wood Modification, Chemical, Thermal and Other Processes. John Wiley& Sons Inc., ISBN-10: 0-470-02172-1.
- Hillis, W. (1975). The Role of Wood Characteristics in High Temperature Drying. *J. Inst Wood Sci.*, 7 (2).
- Jamsa, S., & Viitaniemi, P. (2001). Heat treatment of Wood Better Durability Without Chemicals, Review on Heat Treatments of Wood. *Antibes*.
- Johansson, D. (2005). Drying and Heat Treatment of Wood: Influences on Internal Checking. *Proceedings 3rd Nordic Drying Conference*, (s. 1-10). Karlstad, Sweden.
- Korkut, S., & Bakangil, Ö. (2007). Isıl İşlem Metodları. *WOODWORK Mobilya, Mobilya Yan Sanayi, Mimarlık, Dekorasyon ve Araştırma Dergisi*, 28-34.
- Korkut, S., & Kocaefe, D. (2009). Isıl İşlemin Odun Özellikleri Üzerine Etkisi. *Düzce Üniversitesi Ormancılık Dergisi*, 5(2).
- Mayes, D., & Oksanen, O. (2002). *Thermowood Handbook*. Finland: Finnforest.

- Mıdıroğlu, M. (2015). Isıl İşlem Görmüş Ladin Ağaçlarından Üretilen Masif Panellerin Vernik Etkilerinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Millett, M., & Gerhards, G. (1972). Accelerated Aging: Residual Weight and Flexural Properties of Wood Heated in Air at 115 °C to 175 °C. *Wood Science*, 4 (4).
- Nuopponen, M. (2005). *FT-IR and UV Raman Spectroscopic Studies on Thermal Modification of Scots Pine Wood and its Extractable Compounds*. Espoo-Finland: Helsinki University of Technology, Department of Forest Products 174 Technology, Laboratory of Forest Products Chemistry, Reports Series A 23, Doctoral dissertation.
- Önduran, A. (2015). Endüstriyel Ahşap Doğrama Performansına Isıl İşlem ve Emprenye İşleminin Etkilerinin Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*. içinde
- Özcan, C. (2011). *Yeni Bir Yanma Düzenineğinin Hazırlanması ve Isıl İşlem Görmüş Ağaç Malzemelerin Yanma Özelliklerinin Belirlenmesi*. Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Özdemir, T., & Arslan, R. (2011). Isıl İşlem Uygulamasının Sarıçam ve Dişbudak Odunlarında Bazı Yüzey İşlem Özellikleri Üzerine Etkisi. *I. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu*, (s. 1405-1411). Kahramanmaraş.
- Perçin, O. (2012). *Isıl İşlemin Lamine Ahşap Malzemenin Bazı Teknolojik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya Dekorasyon Eğitimi ABD, Doktora Tezi.

- Poncsak, S., Kocaefe, D., Bouazara, M., & Pichette, A. (2006). Effect of High Temperature Treatment on the Mechanical Properties of Birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science and Technology* 40.
- Repellin, V., & Guyonnet, R. (2005). Evaluation of Heat-Treated Wood Swelling by Differential Scanning Calorimetry In Relation To Chemical Composition. *Holzforschung*, 59(1).
- Schneider, A. (1973). Investigation on the Convection Drying of Lumber at Extremely High Temperatures. *Holz Roh-u Werkstoff*, 31.
- Sefil, Y. (2010). *Thermowood Yöntemiyle Isıl İşlem Uygulanmış Göknar ve Kayın Odunlarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri*. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Sernek, M. (2002). *Comparative Analysis of Inactivated Wood Surfaces*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Doctoral Dissertation.
- Sernek, M., Boonstra, M., Pizzi, A., Despres, A., & Gérardin, P. (2008). Bonding Performance of Heat Treated Wood with Structural Adhesives. *European Journal of Wood and Wood Products*, 66(3), 163-242.
- Stamm, A. (1964). Thermal Degradation of Wood and Cellulose. *Industrial and Engineering Chemistry*, 48(3).
- Sundqvist, B. (2004). *Color Changes and Acid Formation in Wood During Heating*. Lulea University of Technology, Skellefteå Campus, Division of Wood, Doctoral Thesis.
- Syrjänen, T., & Kangas, E. (2000). *Heat Treated Timber in Finland*. International Research Group on Wood Preservation, Doc. No. IRG/WP 00-40158.

- Tjeerdsma, B. (2006). Heat Treatment of Wood- Thermal Modification. *Coford Seminar on Wood Modification: Opportunites and Challenges*. Dublin- Ireland: University of Limerick.
- Tuncer, F. D. (2014). *Isıl İşlemin Sarıçam (Pinus sylvestris L.) Odununun Anatomik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi*. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Ulucan, D. (2012). *Isıl İşlem Koşullarının Ağaç Malzemenin Bazı Özellikleri Üzerine Etkisi ve Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi*. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya ve Dekorasyon Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Viitanen, H., Jämsä, S., Paaanen, L., Nurmi, A., & Viitaniemi, P. (1994). The Effect of Heat Treatment on the Properties of Spruce. A preliminary report. Sweden: Document-the International Research Group on Wood Preservation (IRG/WP).
- Viitaniemi, P. (2000). New Properties for Thermally-Treated Wood. Indust Horizons, 1.
- Yalınkılıç, A. C. (2013). *Isıl İşlemli Ağaç Malzemenin Mobilya Üretiminde Uygunluğunun Araştırılması ve Geliştirilmesi*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Yıldız, S. (2002). *Isıl İşlem Uygulanan Doğu Kayını ve Doğu Ladini Odunlarının Fiziksel, Mekanik ve Kimyasal Özellikleri*. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Zor, M. (2011). Bahçe Oturma Mobilya Konstrüksiyonlarında Isıl İşlem Uygulanmış Ağaç Malzemenin Kullanım İmkanlarının

Mühendislik Tasarımı Yaklaşımıyla İncelenmesi. *Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.*
içinde

BÖLÜM 4

Yapı Endüstrisinde Sürdürülebilir Bir Yenilik: Çapraz Laminasyonlu Ahşap (CLT) Paneller

Mustafa ÖNCEL¹
Alperen KAYMAKCI²

Giriş

Çevre dostu ve geri dönüştürülebilir özellikleriyle öne çıkan ahşap, üretiminden kullanımına kadar ekolojik dengeyi gözeterek insan ve çevre sağlığını koruyan bir yapı malzemesidir. Hafifliği ve işlenebilirliği sayesinde, prefabrikasyon gibi yöntemlerle mevsimden bağımsız ve hızlı inşaat süreçlerine olanak tanır. Ahşap malzemenin estetik avantajlarının yanı sıra, ısı yalıtımı performansında betonarmeye göre 15, çeliğe göre ise 400 kat daha yüksek verimliliktedir. Geleneksel olarak yanıcılığı bir dezavantaj gibi algılansa da, günümüzdeki gelişmiş üretim teknolojileri ve koruyucu uygulamalar sayesinde bu risk artık geçerliliğini yitirmiştir (Erkoç, 2004).

¹ Doktor Öğretim Üyesi, Kastamonu Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-5964-5119

² Profesör Doktor, Kastamonu Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-8009-7775

Masif Ahşap Panel Teknolojisi

Mobilya endüstrisi ile iç mimari ve dekorasyon projelerinde sıklıkla tercih edilen masif ahşap paneller; aynı tür veya benzer özelliklere sahip, kusurlarından temizlenmiş masif ahşap lataların birleştirilmesiyle üretilmektedir. Bu levhaların üretim sürecinde, küçük ahşap parçalar parmak birleştirme (finger joint) gibi yöntemlerle uç uca eklenmekte ve lif yönleri birbirine paralel olacak şekilde hem enine hem de boyuna yapıştırılarak tek parça haline getirilmektedir (Akça, 2003) (Bilgin, 2010) (Mıdıroğlu, 2015).

Masif panel teknolojisi, talep edilen genişliklerde levha üretimini mümkün kılmaktadır (Kahveci, 2003) (Özkaya, 2007). Bununla birlikte, tutkallama ve laminasyon tekniklerindeki teknolojik ilerlemeler, hammaddeyi daha verimli kullanarak doğal masif oduna nazaran boyutsal olarak daha kararlı, hatasız ve estetik açıdan üstün bir malzemenin elde edilmesini sağlamıştır (Dilik T. , 2005) (Oran, 2012).

Lamine Ahşap Teknolojisi

Lamine ahşap teknolojisi ilk olarak 16. yüzyılda Avrupa’da ortaya çıkmıştır. Da Vinci, kütüklerin dilimlenmesi ve üst üste yapıştırılması veya ahşap kamalar çakılarak birbirine bağlanmasıyla oluşturulacak malzemelerin büyük açıklıkları geçebilecek bir taşıyıcı yapı olarak kullanılabileceğini ifade etmiş, bazı araştırmacılar aynı prensipten yola çıkarak değişik boyut ve formlarda taşıyıcı yapı elemanları tasarlamışlardır (Durak, 2015) (Sizüçen, 2008) (Yesügey, 2002).

Lamine ahşap teknolojisinin inşaat sektöründeki ticari serüveni, ilk kez 1934 yılında ABD’de bulunan Forest Product Laboratory çalışmalarıyla başlamıştır. Günümüz teknolojisiyle bu malzemeler, düz taşıyıcı sistemlerde 40 metrenin, kemerli sistemlerde ise 150 metrenin üzerindeki açıklıkların geçilmesine olanak tanımaktadır (Kahraman, 2010).

Lamine malzemeler; içeriklerindeki tutkal bileşenleri sayesinde neme karşı dayanıklı, uzun ömürlü ve performanslı bir kullanım imkanı sağlamaktadır (Doruk, 2009) (Durak, 2015).

Eğmeçli ve geniş hacimli yapı elemanlarının imalatından kusursuz malzeme eldesi sağlaması nedeniyle laminasyon tekniği öne çıkmaktadır. Bu yöntemde; ağaç türü, katman kalınlığı ve şekil gibi parametreler değiştirilerek çeşitli uygulamalar yapılabilmektedir (Kahraman, 2010) (Perçin, 2007) (Şeker, 2011) (TS 3842, 1983).

Lamine ahşap üretiminde katmanlar arası rutubet dengesi kritik bir parametredir. İlgili standartlar incelendiğinde; TS EN 386 ve DIN 68140'a göre katmanlar arasındaki rutubet farkının en fazla %4, ANSI A 190'a göre ise en fazla %5 olması gerektiği görülmektedir. Bu limitlerin aşılması, katmanların farklı çalışma davranışları sergilemesine ve oluşan iç gerilimlerin, ahşabın liflere dik çekme direncini yenerek malzemede çatlaklar oluşturmaya neden olabilmektedir (Baştuğ, 2010) (DIN 68140, 1971) (Döngel, 1999) (Özcan, 2007) (TS EN 386, 1999).

Bu malzemelerin mekanik dayanımı; kullanılan ahşabın anatomik yapısı, yüzey kalitesi, üretimdeki basınç ve süre gibi presleme koşulları ve tutkalın teknik niteliklerine kadar birçok faktörden etkilenmektedir. Presleme aşamasında farklı ağaç türlerinin bir arada kullanılması durumunda, uygulanacak basınç değeri yumuşak ağaç türü baz alınarak belirlenmelidir. Literatürde bu basınç aralıkları; yumuşak ağaçlar için 0,6-1,0 N/mm², sert ağaçlar için ise 0,2-1,6 N/mm² olarak önerilmektedir (Ayan, 2012) (Dilik T. , 1997) (Perçin, 2007).

Masif ahşap malzemelerde 11 N/mm² olan eğilme emniyet gerilmesi, aynı kesite sahip lamine ahşap malzemelerde 14 N/mm² seviyesine çıkmaktadır. Mukavemet değerlerindeki bu artış, lamine

taşıyıcı elemanların kesit boyutlarının küçültülmesine ve daha narin yapıların tasarlanmasına olanak tanımaktadır (Kahraman, 2010).

Mühendislik Ürünü Ahşap Malzemeler

Dünya ölçekli yapısal değişimler; ekonomik dinamiklerdeki farklılaşmalar, yeni üretim modelleri ve özellikle MAM gibi inovatif ahşap ürünlerdeki ilerlemelerin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır (Churkina, 2021).

American Plywood Association tarafından yapılan tanımlamaya göre; lif, kaplama veya kereste formundaki ahşap elemanların, genellikle lif yönleri boyuna paralel olacak biçimde yapısal tutkallarla birleştirilmesi sonucu elde edilen kompozitlere Mühendislik Ürünü Ahşap Malzemeler (MAM) adı verilmektedir. Yapısal Kompozit Keresteler (Structural Composite Lumbers), Yapısal Kompozit Levhalar (Structural Composite Boards), I-kirişler (Wood I-joist), Tutkallı Lamine Kereste (Glued Laminated Timber) ve Çapraz Lamine Ahşap (CLT-Cross Laminated Timber) paneller olmak üzere beş ana grupta sınıflandırılan bu malzemelerden özellikle Glulam ve CLT yangın direnci, sismik performans, akustik konfor ve boyutsal kararlılık gibi yüksek teknik standartları karşılarken, düşük karbon emisyonlu ve yenilenebilir üretim süreçleriyle de ekolojik açıdan avantajlı çözümler sunmaktadır (Şanlıhilal, Yenigün, & Kurt, 2025).

Glulam (Glued Laminated Timber)

İlk kez 1893 yılında İsviçre'nin Basel kentindeki bir oditoryum inşasında kullanılan ve ticari literatürde 'Glulam' olarak bilinen malzeme masif kerestelerin boyut sınırlamalarını aşmak amacıyla geliştirilen bu mühendislik ürünü; ahşap parçaların uç uca, yan yana ve üst üste yapıştırılması tekniğiyle üretilmektedir. Günümüzde Glulam; konut ve diğer yapılarda kiriş, kolon, direk veya eğimli destek gibi yüksek yük taşıma kapasitesi gerektiren

yapısal elemanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Cırrık, 2018) (Oran, 2012) (Stalnaker & Harris, 1997) (Stark & Cai, 2021).

Glulam teknolojisinde lamel kalınlıkları, düz ve az kavisli yapılarda üst sınır 50,8 mm (2 inç) iken, yüksek kavisli ürünlerin imalatında 25,4 mm (1 inç) ile 33 mm değerleri arasında uygulanır. Ek olarak, eğimli ve kavisli malzemelerde lif paralelliğinin sağlanması teknik bir zorunluluktur (Cırrık, 2018) (Çolakoğlu, 2010) (Hekimoğlu, 2014) (Sizüçen, 2008).

Genellikle dış mekanlarda veya yarı kapalı alanlarda tercih edilen Glulam malzemelerin üretiminde, dış ortam tutkalları kullanılmaktadır (Cırrık, 2018).

Başlangıçta büyük açıklıklı ve kavisli kemerlerin inşası için geliştirilen bu teknoloji; zamanla iri boyutlu ve yüksek nitelikli masif kereste temininde yaşanan zorluklar nedeniyle, alternatif ve etkili bir yapısal çözüm aracı olarak yaygınlaşmıştır (Stalnaker & Harris, 1997).

Çapraz Laminasyonlu Ahşap (CLT) Panel

Ahşap panel sisteminin güncel ve yenilikçi bir ürünü Çapraz Laminasyonlu Ahşap (Cross-Laminated Timber) panellerdir. İlk olarak 1990'ların başlarında Avusturya ve Almanya'da görülmeye başlanmış, yine bu tarihlerde ilk CLT bina inşası tamamlanmıştır. Daha sonra, tüm Avrupa ülkelerinde kullanımı giderek artan bir ürün haline gelmiştir (Karacabeyli & Douglas, 2013).

Kuzey Amerika'da ahşap yapılaşmaya yönelik yönetmeliklerde meydana gelen düzenlemeler sonucunda 20 kata kadar ahşap yapı yapımı mümkün hale gelmiş, büyük kamu binaları ile yüksek katlı yapılarda CLT kullanımında artış görülmüştür. Ayrıca Avrupa'da da ticari ve endüstriyel inşaatlarda CLT kullanımı artış eğilimindedir. 2020 yılında CLT panellerin küresel üretim hacmi 2,8 milyon m³ civarlarına çıkmış ve talepte artış görülmüştür.

Küresel CLT pazar büyüklüğünün 2018'de 664 milyon dolar seviyesinde iken 2024 yılında iki katından fazlasına çıkarak 1,457 milyar dolara ulaşması beklenmektedir. Son olarak CLT panel pazarının, 2021'den 2027'ye kadar %12 ila %14'lük bir bileşik yıllık büyüme oranı ile sürekli büyüyeceği öngörülmektedir (Joung, ve diğerleri, 2024).

Yapı malzemesi üretiminden kaynaklanan emisyonlar da dahil olmak üzere inşaat sektörü küresel karbondioksit (CO₂) emisyonlarının %37'sini oluşturmaktadır. Bu bağlamda CLT, iklim değişikliğini hafifletmek adına önemli bir çözüm sunarak geleneksel beton ve çelik yapılara sürdürülebilir bir alternatif yapı malzemesi olarak ortaya çıkmaktadır (Zhao, ve diğerleri, 2025). Fotoğraf 1'de gemini tarafından üretilen CLT yapı tasfiri bulunmaktadır.

Fotoğraf 1 Gemini yapay zeka CLT yapı tasfiri



Kaynak: (URL 1, 2025)

Tanım ve Üretim

Genellikle iğne yapraklı ağaçlardan imal edilen CLT paneller; genellikle 3-5-7 katmanın bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Panelin karakteristik özelliği, ardışık katmanlardaki lif yönlerinin birbirine 90° dik açıyla yapıştırılmasıdır. Ancak, özel

mukavemet gerektiren tasarımlarda, dış yüzeylerde veya çekirdek kısmında liflerin paralel yönlendirildiği uygulamalar da mevcuttur. Katmanların birleştirilmesinde standart tutkallama işleminin yanı sıra çivi veya ahşap kavelaların kullanıldığı teknikler de literatürde yer almaktadır (Cırrık, 2018) (Gagnon, Bilek, Podesto, & Crespell, 2013).

Panel boyutları, üretici firmaların teknik altyapısı ve lojistik (taşıma) kısıtlamalarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu çerçevede üretilen panellerin genişlikleri standart olarak 0,6 m ile 3 m arasında; uzunlukları ise 18 metreye varan ölçülerdedir. Literatürde kaydedilen maksimum panel kalınlığı ise 508 mm'dir (Cırrık, 2018).

Kuzey Amerika ve Avrupa başta olmak üzere dünya genelinde hızla yaygınlaşan CLT; yük taşıyıcı duvar, döşeme ve tavan elemanı olarak çok yönlü bir kullanım profili çizmektedir. Yeni inşaatların yanı sıra köprü yapımı, mevcut binaların renovasyonu, modernizasyonu ve kat eklemeleri gibi uygulamalarda da sağladığı esneklik, malzemenin küresel popüleritesini artıran temel faktördür (D'Aronco, 2015) (Cırrık, 2018).

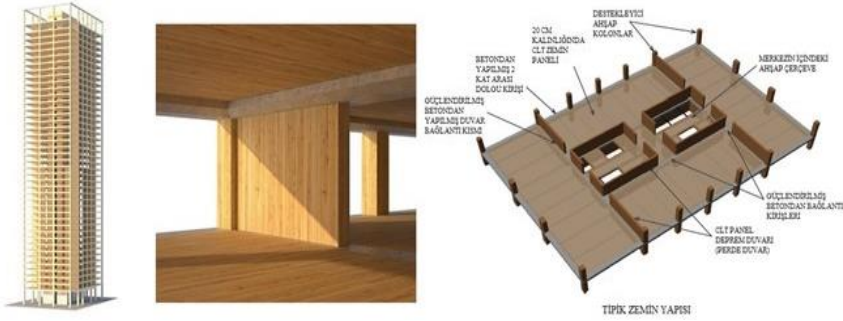
Literatürde yer alan çalışmalar, CLT panellerin sadece tek başına değil; Lamine Kaplama Kereste (LVL), Yönlendirilmiş Yonga Levha (OSB) ve Glulam gibi ahşap türevleriyle veya beton gibi geleneksel yapı malzemeleriyle birlikte hibrit sistemler olarak da kullanılabildiğini ortaya koymuştur (Gagnon, Bilek, Podesto, & Crespell, 2013). Bu hibrit yaklaşımın en dikkat çekici uygulamalarından biri, Almanya Hanover'de Timbertower firması tarafından inşa edilen, 100 metre yüksekliğindeki Glulam-CLT kombinasyonlu rüzgar türbinidir. Bir diğer önemli örnek ise SOM Mimarlık tarafından yürütülen ve 42 katlı bir yapı olarak tasarlanan beton-CLT hibrit sistemli 'Timber Tower' araştırma projesidir. Fotoğraf 2 ve Fotoğraf 3'te bu yapılar görülmektedir.

Fotoğraf 2 Timbertower rüzgar türbini



Kaynak: (URL 2, 2017)

Fotoğraf 3 42 Katlı beton-CLT panel hibrit yapı projesi Timber Tower



Kaynak: (URL 3, 2017)

Literatürde CLT panellerin farklı yapı elemanlarında kullanımı için belirli tasarım kriterleri önerilmiştir. Buna göre; zemin panellerinde kalınlığın en az 102 mm olması, çatı uygulamalarında ise 76 mm'nin üzerindeki kalınlıkların tercih edilmesi ve panellerin mekanik bağlantılarla sabitlenmesi gerekmektedir. Duvar panellerinin birleşiminde ise, ahşabın doğal çalışma davranışı ihmal edilerek ek yerlerinde herhangi bir boşluk bırakılmaması tavsiye edilmiştir (Dagenais, White R., & Sumathipala, 2013)

CLT panellerin tasarımında, elemanın maruz kalacağı yük türüne göre lif yönlendirmesi stratejik bir önem taşır. Duvar uygulamalarında taşıma kapasitesini maksimize etmek için dış katman lifleri yerçekimi doğrultusunda (dikey); döşeme ve çatı sistemlerinde ise ana açıklık yönüne paralel olarak yerleştirilir. Boyutsal stabiliteyi artıran çapraz laminasyon sürecinde genellikle poliüretan, melamin veya fenol esaslı yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Üretim sürecinde kerestelerin hem geniş yüzeyleri hem de dar kenarları tutkallanabilmekle birlikte; seri üretimde kenar tutkallama işlemi atlanarak sadece yüzey yapıştırması da uygulanabilmektedir (Gagnon, Bilek, Podesto, & Crespell, 2013).

Londra'da 2011 yılında hayata geçirilen Bridport Evi projesi, CLT teknolojisinin potansiyelini gösteren önemli bir örnektir. 5 ve 7 katlı bloklardan oluşan yapının, zemin katı da dahil olmak üzere tamamında CLT paneller kullanılmıştır. Literatürde, binanın kaba inşaat sürecinin sadece 12 hafta gibi kısa bir sürede tamamlandığı vurgulanmaktadır (D'Aronco, 2015). Söz konusu yapıya ait görseller Fotoğraf 4'te görülmektedir.

Fotoğraf 4 Bridport Evi



Kaynak: (URL 4, 2017) (URL 5, 2017)

Daha kullanışlı, geniş açıklıklara sahip ve çok katlı ahşap binaların inşası için CLT panellerden oluşan dayanıklı bir çekirdek sistemi önerilmiştir. Geliştirilen bu yeni yapısal modelin, en az 20 katlı binaların yapımına olanak tanıdığı sonucuna varılmıştır (Chapman, 2015).

CLT Panel Üretiminde Hammadde ve Bağlantı Elemanları

Günümüzde CLT panel üretiminde yumuşak ağaç odunları ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. En çok kullanılan yumuşak ağaç odunlarının ise Avrupa ladini (*Picea abies*) ile ona düşük miktarlarda kullanımla eşlik eden Ak göknar (*Abies alba*) olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sarıçam (*Pinus sylvestris*), Avrupa melezi (*Larix decidua*), Duglas göknarı (*Pseudotsuga menziesii*) ve İsviçre fıstık çamı (*Pinus cembra*) gibi yumuşak ağaç türlerinin de kullanıldığı belirtilmiştir. Buna ek olarak, CLT panel üretiminde sert ağaçların kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu bağlamda tamamen huş (*Betula pendula*) ağacından üretilmiş CLT panellerden oluşma 3 katlı binalar inşa edildiği bildirilmektedir. CLT panel üretiminde kullanılabilecek sert ağaçlara ek olarak kavak (*Populus spp.*) ve dişbudak (*Fraxinus spp.*) türlerinin de ilave edilebileceği belirtilmiştir (Brandner, 2013).

CLT panel üretimi için yakın çevrede yetişen her türlü ağaç türünün kullanım imkanını sağlamak amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda, sert ağaçlardan üretilen deney panellerinin yöresel odun kaynaklarının değerlendirilmesinde ve yöresel ahşap esaslı sanayinin geliştirilmesinde katkı sağladığı sonucu tespit edilmiştir (Callegari, Cremonini, Rocco, Spinelli, & Zanuttini, 2010).

CLT panel üretiminde kullanılabilecek ağaç türleri ile ilgili yapılan diğer çalışmalar sonucu CLT panellerde eğilme direnci değerinin artırılması için panellerde enine yöndeki ara tabakalarda veya en üst tabakalarda huş, dişbudak ve yalancı akasya gibi daha sağlam ağaç türlerinin kullanılabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, panellerin eğilme direnci değerlerinin, levha kalınlığını artırma veya azaltmaya ihtiyaç bile duymadan enine yöndeki tabakalarda huş veya kavak gibi türlerin kullanımı sayesinde eğilmede kayma direncinin artırılması sonucu arttırılabileceği ifade edilmiştir (Brandner, 2013).

Kavak ve benzeri düşük yoğunluklu ağaç türleri, ekonomik olmalarının yanı sıra hafif yapıları sayesinde sismik açıdan avantajlı bir hammadde seçeneği sunmaktadır. Ancak, ANSI/APA PRG 320 standardında yer alan minimum $0,35 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk şartı, bu türlerin CLT panel üretiminde yaygınlaşmasının önünde kısmi bir engel teşkil etmektedir (Marko, Bejó, & Takats, 2016).

Avrupa’da CLT panel üretiminde üreticilerin ahşapları birbirine ekleyerek uzatmak için kullandığı 2 tip parmak birleştirme yöntemi olduğu belirtilmiş, bunlardan klasik olanının ahşap yüzeyine dik doğrultuda açılan, diğerinin ise ahşap yüzeyine yatay doğrultuda açılan parmak birleştirmelerin olduğu ifade edilmiştir. Ahşap yüzeyine dik açılan parmak birleştirmenin aksine yatay açılan parmak birleştirmelerin ahşap yüzeylerinde görülebilirliğinin düşük olduğu ve CLT panellerin yüzeylerine bakıldığında bu birleştirmelerin ayırt edilmesinin zor olduğu tespit edilmiştir. Bu uygulama panele görsel olarak kalite kazandırmaktadır. Ayrıca, yatay parmak birleştirmelerin hava iletimini azaltması gibi CLT panellere sağladığı avantajlar bulunmaktadır (Brandner, 2013).

Literatürde CLT panel üretiminde fenol-resorsinol formaldehit, Emülsiyon Polimer İzosiyanat (EPI) ve poliüretan esaslı yapıştırıcıların kullanıldığı belirtilmiştir (Yeh, Gagnon, Williamson, & Pirvu, 2012). Bu seçenekler arasında en sık tercih edilen tür poliüretan olmakla birlikte; bazı üretim tesislerinde melamin-üre formaldehit tutkallarının da kullanıldığı rapor edilmiştir (Grasser, 2015). Fenol ve melamin tabanlı tutkalların kullanımında yapışma kalitesinin iyi olması için pres basıncının $1,40\text{N/mm}^2$ ile $2,00\text{N/mm}^2$ arasında olması gerektiği bu değer poliüretan tutkallarda ise $0,01\text{N/mm}^2$ ile $0,1\text{N/mm}^2$ arasında olduğu tespit edilmiştir (Kairi, 2002).

CLT ve benzeri ahşap yapılarda kullanılan bağlantı elemanları ve türleri, yapıya sağlamlık, rijitlik, stabilite ve esneklik kazandırmada önemli bir rol üstlenmektedir. Dolayısıyla bağlantı

elemanı seçimi konusunda tasarımcıların daha dikkatli davranmaları gerektiği ifade edilmiştir. Yapılan incelemeler sonucu oluşan problemlerin yetersiz bağlantı tasarımları sonucu olduğu görülmüştür (Mohammad, Douglas, Rammer, & E., 2013). Bu bağlamda, kullanılacak bağlantı elemanlarının, bu elemanların kullanım düzeninin ve duvar tasarımının üretilen duvarların genel davranış özellikleri üzerine önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Ayrıca, CLT panellerin esnek bir yapıda olmadığı ancak, kullanılan bağlantı elemanlarının panellere sismik koşullarda gereken esnekliği sağladığı tespit edilmiştir (Pei, Popovski, & Van de Lindt, 2012).

Bir çalışmada çeşitli konfigürasyonlarda ve bağlantı elemanlarına sahip CLT duvar panellerinin performansları test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çivi veya vidalar çelik köşebentler ile kullanıldığında CLT duvarlarının yeterli sismik performansa sahip olabileceği görülmüştür. Ancak, CLT duvarları zemine bağlamak için çapraz vidalanmış uzun vidaların kullanılması duvarların sünek davranışlarını azaltması nedeniyle yüksek sismik aktiviteye sahip bölgelerde önerilmemektedir (Popovski, Schneider, & Schweinsteiger, 2010).

Başka bir çalışmada bağlantı elemanı olarak akıllı vida kullanımında bağlantının makaslama direnci incelenmiştir. Akıllı vidaların sismik uygulamalarda kullanılacak sistemler için gerekli sünekliği sağladığı görülmüştür. Statik akma direnci ortalama olarak 80 KN/m ve ortalama süneklik oranı 7,7 olarak tespit edilmiş ayrıca, periyodik akma direnci ortalama 68KN/m ve ortalama süneklik oranı 4,1 olarak tespit edilmiştir (Danzig, Closen, & Tannert, 2014).

Literatürde 40x50x9mm ölçülerindeki ufak parçaların parmak birleştirme tekniği kullanılarak ve tutkallanarak CLT panel üretimi yapılabileceği görülmüştür. Bu sayede küçük çaplı ve düşük ekonomik değere sahip ağaçların etkili olarak kullanılabilmesine imkan sağlanmaktadır (Espinoza, Buehlmann, & Mallo, 2015).

Literatürde ağaç tomruklarının trapez şeklinde kesilmesi ile kereste biçme verimindeki artış ve biçilen kerestelerin CLT panel üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma sonucu 185 milimetreden küçük çaplı tomruklarda trapez kesim işlemi üretimde kullanılabilecek ahşap malzeme veriminde %17,4 oranında artış sağlamıştır. Buna karşın, tüm tomruklarda trapez biçme işlemi ahşap biçme veriminde düşüşe neden olmuştur. Sonuç olarak trapez biçme işlemi küçük çaplı tomrukların CLT panel üretiminde kullanılması durumunda verim artışı sağladığı gözlemlenmiştir (Fredriksson, Bomark, Broman, & Grönlund, 2015).

CLT Panellerin Teknolojik Özellikleri

Glulam üretiminde kullanılan bazı standartlar CLT panel üretiminde de kullanılmaktadır. Bu bağlamda, EN 386 ve PR EN 14080'e göre glulam üretiminde lamel kalınlığı 35mm ve aşağısında ise pres basıncının 0,60N/mm² olması gerekmektedir. Bunun yanında, lamel kalınlığı 36mm ile 45mm arasında ise pres basıncının 0,80-1,00N/mm² arasında olması gerektiği belirtilmiştir. Bu bağlamda, tutkallanacak yüzeylerde meydana gelebilecek plastik deformasyonun önlenmesi amacıyla pres basıncının 1,1N/mm²'nin üzerinde olmaması gerektiği sonucuna varılmıştır (Brandner, 2013).

Hızlı büyüyen okaliptüs (*Eucalyptus urophylla-Eucalyptus grandis*) odununu kullanarak üç tabakalı CLT paneller üretmiş ve bunların özelliklerini araştırmıştır. Üretimde tek bileşenli poliüretan tutkalı kullanılmış; elde edilen okaliptüs esaslı panellerin, piyasadaki mevcut yumuşak ağaç panellerle eşdeğer mekanik dayanıklılığa sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Liao, ve diğerleri, 2017).

Ponderosa çamı (*Pinus ponderosa*) kullanarak üretilen 5 katmanlı CLT panellerin yapısal performansını incelenmiştir. Testler sonucunda, panellerin eğilme direnci ve rijitlik değerlerinin ABD standartlarında talep edilen seviyelerin üzerinde olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışma kapsamında gerçekleştirilen yangın ve akustik

deneyleri, söz konusu panellerin ahşap yapı endüstrisinde güvenle kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Hindman & Bouldin, 2014).

Düşük mukavemetli yöresel ağaç türlerinin değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmada Loblolly çamı (*Pinus taeda*) ve Bataklik çamı (*Pinus elliottii*) türlerinin üretime uygunluğu test edilmiştir. Yapılan testlerde numunelerin dayanıklılık değerleri C14 sınıfının altında kalsa da; kereste hacmini artırmaya gerek duymadan sadece katman kalınlıkları ve lif yönlendirmeleri optimize edilerek panel dayanımının artırılabilceği görülmüştür (Baño, Godoy, & Vega, 2016).

Literatürde dış katmanlarında Avrupa ladini (*Picea abies*), orta katmanında ise Avrupa kayını (*Fagus sylvatica*) bulunan 3 tabakalı hibrit CLT panellerin mekanik davranışları analiz edilmiştir. Yüzeye paralel kuvvetler altında gerçekleştirilen eğilme testleri sonucunda; panellerin makaslama direncinin, dışta kullanılan ladin malzemenin boyuna makaslama direncinden belirgin şekilde etkilendiği saptanmıştır (Aicher, Hirsch, & Christian, 2016).

Bir çalışmada, PVAc tutkalı emdirildikten sonra pres kullanılarak sıkıştırılan ve farklı yoğunluklar kazandırılan Hindistan cevizi odunlarının CLT panel üretimine uygunluğu incelenmiştir. Dış katmanlarda yüksek yoğunluklu, çekirdek kısmında ise orta ve düşük yoğunluklu lamellerin kullanıldığı tasarımda; yapıştırıcı olarak PVAc, Melamin-Üre Formaldehit (MÜF) ve Üre Formaldehit (ÜF) kullanılmıştır. Sonuç olarak üretilen panellerin standartların üzerinde bir mekanik performans sergilediği, özellikle MÜF tutkalı ve orta yoğunluklu çekirdek kombinasyonunun, eğilme direnci ve elastikiyet modülü açısından en yüksek değerleri sağladığı görülmüştür (Oran, 2012).

Başka bir çalışmada; CLT panel üretiminde kullanılan tutkallara nanokil eklenmesinin malzeme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. PVAc D-3 tutkalına %1, %2 ve %4

oranlarında nanokil ilave edilerek hazırlanan numuneler, ayrı ayrı PVAc ve Epoksi ile üretilen ve kil ilave edilmeyen kontrol gruplarıyla kıyaslanmıştır. Delaminasyon testlerinde numunelerin yapışma hatlarının %50'lik kısmında ayrılmalar gözlemlenmiş, tespit edilen değerlerin kontrol gruplarının değerlerinden %10-15 daha fazla olduğu görülmüştür. Nanokil ilavesiyle eğilme direnci göknar panellerde %12, sarıçamda %31 artarken; basınç direncindeki artış oranları göknarda %100'ü, sarıçamda ise %52'yi bulmuştur. Bu bulgular, tutkala nanokil eklenmesinin, CLT panellerin yük taşıma kapasitesini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir (Hekimoğlu, 2014).

Poliüretan ve fenol-resorsinol formaldehit tutkalları kullanılarak üretilmiş panellerin performans özellikleri birbiri ile kıyaslanmıştır. 0,8N/mm² pres basıncında üretilen ve poliüretan tutkalı kullanılan levhaların makaslama direnci değeri fenol-resorsinol formaldehit tutkalı ile üretilen levhalarından yüksek olarak tespit edilmiştir. 0,8N/mm² pres basıncının daha altında poliüretan tutkalı kullanılarak üretilen levhalarda delaminasyon miktarı yüksek oranda çıkmıştır. Fenol-resorsinol formaldehit ile üretilen levhaların delaminasyon değerleri oldukça iyi olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, CLT deney numunesindeki en dar ahşap lamelin genişliğinin delaminasyonun derinliğini belirlediği gözlemlenmiştir (Sikora, McPolin, & Harte, 2016).

Bir çalışmada CLT panel ve hibrit CLT (HCLT) panelin eğilme direnci değerleri ölçülmüştür. Biri kontrol grubu olan klasik CLT panel ile 3 deney grubu olan HCLT paneller üzerinde deneyler uygulanmıştır. Dış tabakalarında lamine kaplama kereste (LVL) kullanılan HCLT panellerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri klasik CLT panellerin değerlerinden sırası ile %36 ve %19 oranlarında daha yüksek ölçülmüştür. Enine yöndeki çapraz tabakalarda Lamine Şerit Kereste (LSL) kullanıldığında ise HCLT panellerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri klasik CLT

panellerin değerlerinden sırası ile %24 ve %13 oranlarında daha yüksek olarak tespit edilmiştir (Wang, Gong, & Chui, 2015).

Başka bir çalışmada ladinden (*Picea abies* L.) üretilmiş CLT panellerin delaminasyon özellikleri incelenmiştir. Üretimde tek bileşenli poliüretan tutkalı kullanılmıştır. Deneyler sonucu numunelerin şekli ve tabaka sayılarının delaminasyon direncini etkilediğı tespit edilmiştir. Kare şekilli ve tabaka sayısı çok olan numunelerde delaminasyon miktarı yuvarlak şekilli ve tabaka sayısı az olan numunelere kıyasla daha fazla oranda tespit edilmiştir. Tabaka kalınlıklarının ve pres basıncının delaminasyon özelliklerine etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir (Knorz, Torno, & Van de Kuilen, 2017).

Literatürde şerit şeklinde ve panel şeklindeki deney numunelerinin direnç özellikleri birbiri ile kıyaslanmıştır. Eğilme deneylerinin sonuçları karşılaştırıldığında şerit şeklindeki numunelerin dayanıklılık ve sağlamlık özelliklerinin orijinal panellerin dayanıklılık ve sağlamlık özelliklerinden farklı olduğu görülmüştür (Steiger & Gülzow, 2010).

CLT panellerin eğilmede kayma direnci değerleri incelenmiştir. CLT deney panelleri poliüretan tutkalı vasıtasıyla ladin-çam-göknar ağacı ahşapları kullanılarak üretilmiştir. Çalışmada levhalar 3 katlı ve 5 katlı olacak şekilde 0,1MPa (0,1N/mm²) ve 0,4MPa (0,4N/mm²) pres basınçları altında preslenerek üretilmiştir. Çalışma sonucu, daha yüksek pres basıncıyla preslenen CLT numunelerin ortalama eğilmede kayma direncinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Enine doğrultudaki çapraz tabakasinda daha ince lamellerin kullanılması durumunda ise panellerin eğilmede kayma direncinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Li, Lam, & Li, 2014).

Sonuç

Çapraz Laminasyonlu Ahşap (CLT) paneller, ahşap yapı sistemleri içinde yüksek taşıma kapasitesi, boyutsal stabilizasyon ve hızlı inşaat avantajları sayesinde modern mühendislik ürünü olarak hızla yükselen bir yapı malzemesidir. Bu paneller, glulam ve beton gibi malzemelerle hibrit kullanıma olanak tanıyarak 42 katlı Timber Tower projesi gibi çok katlı yapıların inşasını mümkün kılmaktadır.

Yapılan araştırmalar; yöreye ait ve kavak gibi düşük yoğunluklu ağaç türlerinin kullanımının panel dayanıklılığını artıracak tabaka optimizasyonları ile mümkün olduğunu göstermektedir. Nanokil ilavesi gibi kimyasal modifikasyonlarla mekanik özellikler önemli ölçüde iyileştirilebilirken, poliüretan tutkalı ve presleme basıncındaki optimizasyon ile yapışma kalitesi en üst düzeye çıkarılabilmektedir. Özellikle sismik performansta kritik rol oynayan bağlantı elemanları seçimine büyük özen gösterilmesinin gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

CLT yapılar, ahşabın sürdürülebilir ve estetik yapısı, modern yapı mühendisliğinin sağladığı avantajlar ve gelişmeler sayesinde geleceğin yapı malzemesi olma potansiyelini taşımaktadır.

Kaynakça/References

- Aicher, S., Hirsch, M., & Christian, Z. (2016). Hybrid Cross-Laminated Timber Plates with Beech Wood Cross Layers. *Construction ve Building Materials*, 124, 1007-1018.
- Akça, C. (2003). Masif Ahşap Panel Sektörüne Genel Bakış ve Masif Ahşap Paneller. *Laminart Dergisi, İstanbul*, 27, 92 – 95.
- Ayan, S. (2012). Isıl İşlemlili Ahşap Lamine Panellerin Akustik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya Dekorasyon Eğitimi ABD, Doktora Tezi*.
- Baño, V., Godoy, D., & Vega, A. (2016). Experimental ve Numerical Evaluation of Cross Laminated Timber (CLT) Panels Produced with Pine Timber from Thinnings in Uruguay. *World Conference on Timber Engineering, Vienna, Austria*.
- Baştuğ, İ. (2010). Isıl İşleme Maruz Bırakılan Lamine Ağaç Malzemenin Bazı Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Bilgin, Y. (2010). Türkiye’de Masif Panel Sektörünün Yapısal Durumu ve Ağaç İşleri Endüstrisindeki Kullanım Olanakları. *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Brandner, R. (2013). Production ve Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. *In Focus Solid Timber Solution-European Conference on Cross-Laminated*, 21-22.
- Callegari, G., Cremonini, C., Rocco, V. M., Spinelli, A., & Zanuttini, R. (2010). The Production of Hardwood X-Lam Panels to Valorize the Forest-Wood Chain in Piemonte (Italy). *Proceedings of the World Conference on Timber*

Engineering, Conference on Earthquake Engineering ve Seismicity, Geneva, Switzerland.

Chapman, J. (2015). Timber Multi-Level Buildings to 20 Levels Based on a Central Core of Integrated CLT Panels. *New Zealand Timber Design Journal, Vol 23· Issue 2.*

Churkina, G. H. (2021). Forest Sector Outlook Study 2020-2040. <https://unece.org/info/publications/pub/362308>.

Cırrık, Ö. (2018). Tabaka Oryantasyonunun Kavak, Çam ve Ladin'den Üretilmiş Kontrplak ve LVL'lerin Bazı Teknolojik Özellikleri Üzerine Etkisi. *K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.*

Çolakoğlu, G. (2010). Tabakalı Ağaç Malzeme Ders Notları. *K.T.Ü. Orman Fakültesi, Trabzon.*

Dagenais, C., White R., H., & Sumathipala, K. (2013). Fire Performance of Cross Laminated Timber Assemblies. *CLT Handbook, Chapter 8. FPInnovations and Binational Softwood Lumber.*

Danzig, I., Closen, M., & Tannert, T. (2014). High Performance Cross-Laminated-Timber Shear Connection with Self-Tapping Screw Assemblies. *In Proc. World Conf. Timber Eng. Quebec City, 3-4.*

D'Aronco, G. (2015). An Algorithm for Numerical Modelling of Cross-Laminated Timber Structures. *Università Degli Studi Di Padova, Dipartimento Di Ingegneria Civile Edile E Ambientale Icea, Corso Di Laurea In Ingegneria Civile, Tesi Di Laurea Magistrale.*

Dilik, T. (1997). Lamine Ağaç Malzemededen Pencere Profili Üretimi ve Bazı Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.*

- Dilik, T. (2005). Masif Panel Pazarı ve Üretim Teknolojisindeki Yenilikler. *Mobilya Dekorasyon Dergisi, Kasım-Aralık 2005, sayı 69i İstanbul*, 292-304.
- DIN 68140. (1971). Wood Finger-jointing. *Deutsches Institut für Normung E.V.*
- Doruk, Ş. (2009). Lamine Ağaç Malzemede Vernik ve Emprenye İşlemlerinin Yaşlandırmaya Etkisinin Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya Dekorasyon Eğitimi ABD, Doktora Tezi.*
- Döngel, N. (1999). Lamine Ahşap Malzemede Ağaç Türü, Katman Sayısı ve Tutkal Çeşidinin Eğilme Direncine Etkileri. *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.*
- Durak, M. (2015). Yangın Geciktirici Üst Yüzey İşlemi Uygulanmış Lamine Ağaç Malzemelerin Isı İletkenliği ve Yanma Özelliklerinin Belirlenmesi. *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya Dekorasyon Eğitimi ABD, Yüksek Lisans Tezi.*
- Erkoç, E. (2004). Günümüz Teknolojisiyle Üretilen Ahşap Konutların Tasarım-uygulamaKullanım Üçgeninde Değerlendirilmesi (İstanbul Örnekleri). *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.*
- Espinoza, O., Buehlmann, U., & Mallo, M. F. (2015). Cross-Laminated Timber in the United States: Opportunities ve Challenges. *21. Internationales Holzbau-Forum,.*
- Fredriksson, M., Bomark, P., Broman, O., & Grönlund, A. (2015). Using Small Diameter Logs for Cross-Laminated Timber Production. *BioResources, 10(1)*, 1477-1486.

- Gagnon, S., Bilek, E. M., Podesto, L., & Crespell, P. (2013). Introduction to Cross Laminated Timber,. *CLT Handbook, Chapter 1, FPInnovations. Montreal, Canada.*
- Gagnon, S., Francis, S., & Stockton, B. M. (2013). Lifting ve Handling of Cross-Laminated Timber Elements. *CLT Handbook, Chapter 12, FPInnovations, Montreal, Canada.*
- Grasser, K. K. (2015). Development of Cross-Laminated Timber in the United States of America. *A Thesis Presented for the Master of Science Degree The University of Tennessee, Knoxville.*
- Hekimoğlu, V. (2014). Göknaar ve Sarıçam Odunlarından Nanokil İlaveli Çapraz Lamine Kereste Üretim Olanaklarının İncelenmesi. *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.*
- Hindman, D., & Bouldin, J. (2014). Development of Southern Pine Cross-Laminated Timber for Building Code Acceptance. *World Conference on Timber Engineering, Quebec City, Canada, August 10-14.*
- Joung, J. G., Kwon, D. H., Im, H. J., Lee, H. I., Cho, H. J., & Pang, S. J. (2024). Timber Construction Materials in Modern Timber Buildings: Domestic and Global Market Trends. *Trends in Agriculture & Life Sciences, 62,, 13-32.*
- Kahraman, N. (2010). Vakumlu Membran Preslerde Kavisli Lamine Ahşap Elemanların Üretilirliğinin Deneysel İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya Dekorasyon Eğitimi ABD, Doktora Tezi.*
- Kahveci, M. (2003). Masif Panel Üretimi ve Özellikleri. *Ahşap Teknik Dergisi, İstanbul, 33, 76 – 87.*

- Kairi, M. (2002). Glued/Screwed Joints/Screw Glued Wooden Structures. *COST Action E13*, 115.
- Karacabeyli, E., & Douglas, B. e. (2013). CLT Handbook: Cross Laminated Timber. *U.S. Edition. FPInnovations. Montreal, Canada*.
- Knorz, M., Torno, S., & Van de Kuilen, J. W. (2017). Bonding Quality of Industrially Produced Cross-Laminated Timber (CLT) as Determined in Delamination Tests. *Construction and Building Materials*, 133, 219-225.
- Li, M., Lam, F., & Li, Y. (2014). Evaluating Rolling Shear Strength Properties of Cross Laminated Timber by Torsional Shear Tests and Bending Tests. *Stud*, 10(18.5), 280.
- Liao, Y., Tu, D., Zhou, J., Zhou, H., Yun, H., Gu, J., & Hu, C. (2017). Feasibility of Manufacturing Cross-Laminated Timber Using Fast-Grown Small Diameter Eucalyptus Lumbers. *Construction and Building Materials* , 132, 508-515.
- Marko, G., Bej3, L., & Takats, P. (2016). Cross-Laminated Timber Made of Hungarian Raw Materials. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 123, No. 1)*.
- Mıdıroğlu, M. (2015). Isıl İşlem Görmüş Ladin Ağaçlarından Üretilen Masif Panellerin Vernik Etkilerinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Mohammad, M., Douglas, B., Rammer, D., & E., P. S. (2013). Connections in CrossLaminated Timber Buildings. *CLT Handbook, Chapter 9. FPInnovations. Montreal, Canada*.
- Oran, B. (2012). Hindistan Cevizi (Cocos nucifera L.) Odunu ile Üretilen Çapraz Yapıştırılmış Lamine Kerestelerin Bazı

Teknolojik Özellikleri. K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Özcan, C. (2007). Farklı Ağaç Malzemelerden Üretilen Emprenyeli Lamine Ağaç Malzemelerin Isı İletkenliklerinin Belirlenmesi. *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya Dekorasyon Eğitimi ABD, Y. Lisans Tezi.*

Özkaya, K. (2007). Farklı Yapım Teknikleri İle Üretilen Masif Ahşap Panellerin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya Dekorasyon Eğitimi ABD, Doktora Tezi.*

Pei, S., Popovski, M., & Van de Lindt, J. W. (2012). Seismic Design of a Multi-Story Cross Laminated Timber Building Based on Component Level Testing. *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*, 22 (9), 244-252.

Perçin, O. (2007). Lamine Edilmiş Ahşap Malzemeye Deniz Suyunun Etkisi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya ve Dekorasyon Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.*

Popovski, M., Schneider, J., & Schweinsteiger, M. (2010). Lateral Load Resistance of Cross-Laminated Wood Panels. *In World Conference on Timber Engineering*, 20-24.

Sikora, K. S., McPolin, D. O., & Harte, A. M. (2016). Shear Strength and Durability Testing of Adhesive Bonds in Cross-Laminated Timber. *The Journal of Adhesion*, 92(7-9), 758-777.

Sizüçen, A. (2008). Titrek Kavak Yongalarından Üretilen (LSL, LVL, PSL) Lamine Ağaç Malzemelerin Direnç

Özelliklerinin Belirlenmesi. *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Stalnaker, J., & Harris, E. (1997). *Structural Design in Wood*. Springer Science & Business Media. Boston, MA.

Stark, N., & Cai, Z. (2021). Wood-based composite materials: panel products, glued laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composites. *Chapter 11 in Forest Products Laboratory-General Technical Report-282*.

Steiger, R., & Gülzow, A. (2010). Validity of Bending Tests on Strip-Shaped Specimens to Derive Bending Strength and Stiffness Properties of Cross-Laminated Solid Timber (X-lam). *The Future of quality control for wood and wood products*, 4-7.

Şanlıhilal, Ş., Yenigün, A. G., & Kurt, R. (2025). Tutkallı Lamine ve Çapraz Lamine Kerestelerin Çok Katlı Yapılarda Kullanımı ile İlgili Yeni Gelişmeler. *International Yıldırım Bayezid Scientific Research and Innovation Symposium-I. May 09-10, 2025 Bursa Technical University, Bursa, Türkiye*.

Şeker, C. (2011). Çeşitli Malzemeler ile Desteklenmiş Ahşap Lamine Elemanların Direnç Özellikleri. *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mobilya Dekorasyon Eğitimi ABD. Yüksek Lisans Tezi*.

TS 3842. (1983). Yapıştırılmış Lamine Ahşap Yapı Elemanları. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.

TS EN 386. (1999). Yapıştırılmış lamine ahşap- Performans ve asgari imalat şartları. *Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA*.

URL 1. (2025, Aralık 04). <https://gemini.google.com/share/245020f10d7b> adresinden alındı

- URL 2. (2017, Eylül 04). <http://newatlas.com/timbertower-wooden-windturbine/25007/#gallery> adresinden alındı
- URL 3. (2017, Eylül 04). <http://worldarchitecture.org/architecture-news/czecz/somreleases-timber-tower-research-project.html> adresinden alındı
- URL 4. (2017, Mayıs 08). http://www.europeanwood.org.cn/upload/media/media/5/.thumb_800_524_case67%5B216%5D.jpg adresinden alındı
- URL 5. (2017, Mayıs 08). http://www.peterbrett.com/media/1821/pba_website_project_colville_banner2_2016.jpg adresinden alındı
- Wang, Z., Gong, M., & Chui, Y. H. (2015). Mechanical Properties of Laminated Strand Lumber and Hybrid Cross-Laminated Timber. *Construction and Building Materials*, 101, , 622-627.
- Yeh, B., Gagnon, S., Williamson, T., & Pirvu, C. (2012). The Cross-Laminated Timber Standard in North America. *World Conference on Timber Engineering*, 15, 19 July, Session 46, Standards 1, New Zealand.
- Yesügey, S. C. (2002). Tutkalı Tabakalı Ahşap Strüktürlerin Malzeme Özellikleri Yönünden İncelenmesi. 1. *Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi, Kongre Bildirileri* 2. Cilt, TMMOB İstanbul Büyükşehir Şubesi Çizgi Basım Yayın Ltd. Şti., İstanbul.
- Zhao, J., Wang, J., Denes, L., Liu, Z., Anderson, N., Bergman, R., & ... Hu, W. (2025). Life cycle assessment of hardwood cross-laminated timber production in the eastern United States. *Journal of Cleaner Production*.

BOR KATKILI YONGALEVHALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN MELAMİN YÜZEY METODOLOJİSİ İLE OPTİMİZASYONU

1. Muhammed Zakir TUFAN¹

Giriş

Sunta olarak bilinen yongalevha, ahşap yongaları veya düşük değerli ahşap parçacıklarının (tahta talaşı, talaş vb.) üre-formaldehit, melamin üre-formaldehit gibi uygun ahşap yapıştırıcılarıyla bir araya getirilerek sıkıştırılması ve preslenmesi sonucu elde edilen çevre dostu bir yapı malzemesidir (Jiang vd., 2020; Bacigalupe ve Escobar vd., 2021; Lee vd., 2022). Bir başka tanıma göre, yongalevha, yüksek sıcaklık ve basınç altında birleştirilen lifli yapıdaki ahşap malzemelerin farklı boyut ve şekillerdeki parçacıklarından oluşan bir tür tabakalı ahşap kompozittir (Bardak vd., 2019). Pres altında sıkıştırılan ahşap parçacıkları kurutularak şekillendirilir ve yongalevha panelleri oluşturulur. Genellikle tabakalı ahşap kompozit malzeme olarak adlandırılan yongalevha, üç temel bileşenden oluşur: yapıştırıcı, lif (partikül) ve katkı maddeleri veya dolgu malzemeleri (Owodunni vd., 2020).

Yongalevhalar katsayılarına göre tek tabakalı, beş tabakalı, üç tabakalı ve katları belirsiz olmak üzere dörde ayrılmaktadır (Akbulut ve Ayrılmış, 2024). Bunlar içerisinde en çok kullanılan yongalevhanın üç katmanı vardır: iki yüz tabaka ve bir orta

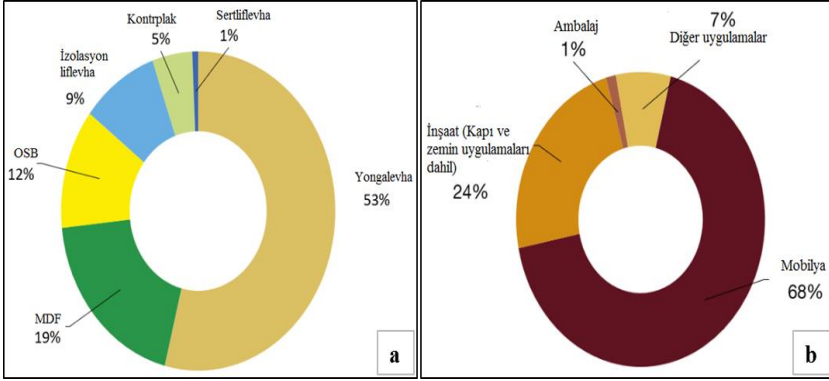
¹ Dr, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, 0000-0002-6110-7018

tabakadan oluşmaktadır. Yüzey tabakaları ince parçacıklardan, orta tabaka ise kaba parçacıklardan meydana gelmiştir. Yüzey tabakaları kaplamaya elverişli olması için ayrıca pürüzlü bir yapıda olması istenir (Baharoğlu vd., 2013; Bardak vd., 2019; Bacigalupe and Escobar vd., 2021).

Yongalevhaların fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılan hammadde ve üretim şartlarına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu farklılıklar üzerinde kullanılan tutkal miktarı ve türü, ahşap parçacıkların boyutu ve geometrisi, nem içeriği, formaldehit/üre mol oranı, pres tipi, pres süresi vb. önemli derecede etkili olabilmektedir. Özellikle kullanılan tutkal miktarı ve pres süresinin artırılması, üretilen yongalevhaların fiziksel, mekanik özellikleri ile istenilen yüzeyin elde edilmesinde önemli derecede etkili olduğu belirlenmiştir (Baharoğlu vd., 2013; Farrokhpayam vd., 2016; Owodunni vd., 2020).

Yongalevha, üretilen ahşap esaslı kompozit malzemeler içerisinde küresel çapta önemli ürünlerden (Şekil 1a) bir tanesidir. Aynı zamanda düşük maliyeti ve üretiminin kolay olması farklı alanlarda (Şekil 1b) kullanımını da yaygın hale getirmiştir. Yongalevha, mobilya üretimleri, dolaplar, merdiven basamakları, masa tablaları, raflar, sürgülü kapılar, ahşap panel dolapları, birçok ofis mobilyası zemin altlığı, ev inşaatı, makyaj masası, ofis masası, hoparlörler, masa tenisi masaları, bilardo masaları, mutfak tezgâhı, iç dekorasyon vb. alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Nemli vd., 2007; Hosseini and Fadaei, 2013; Baharoğlu vd., 2013; Bardak vd., 2019; Owodunni vd., 2020; Jiang vd., 2020; Lee vd., 2022; Shi vd., 2024).

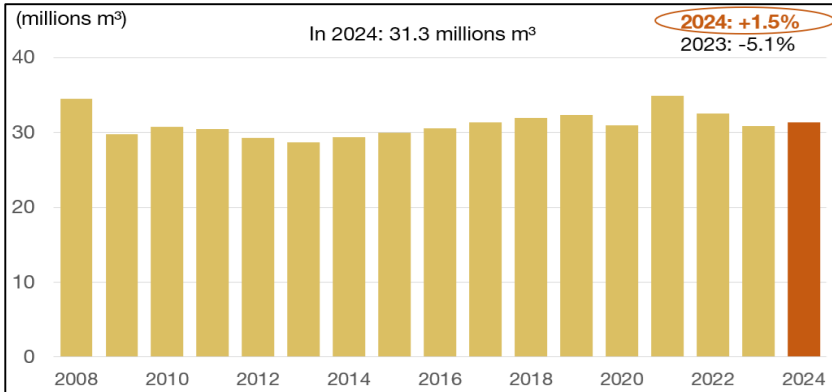
Şekil 1. a) Ahşap esaslı üretilen levhaların oransal dağılımı b)
Yongalevhanın kullanım alanları



Kaynak: (Europanel, 2024)

En yaygın kullanılan ahşap bazlı ürünlerden biri olan yongalevhaya olan talep son yıllarda istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Şekil 2’de yongalevhanın 2008-2024 yılları arasında üretimdeki değişimler verilmiştir.

Şekil 2. EU27-UK-EFTA ülkelerindeki yongalevhanın yıllık bazda üretim miktarları



Kaynak: (Europanel, 2024)

Çalışmada kullanılan deney tasarımı (DOE) ise, bir deneyin sonuçlarını şekillendiren faktörlerin göreceli önemini, çıktılar üzerindeki bireysel ve ortak etkilerini analiz eden istatistiksel bir yaklaşımdır. Bu metodoloji, en verimli sonuçları doğuran faktör kombinasyonlarını minimum deneme sayısı ile saptamaya olanak tanıyarak zaman ve maliyetten önemli ölçüde tasarruf sağlar (Abd-El-Aziz vd., 2022; Ferreira vd., 2023; Mahmoud ve McConville, 2023). RSM ise, DOE'den elde edilen verileri kullanarak bağımsız değişkenler ile sonuçlar arasındaki ilişkiyi analitik bir fonksiyonla modelleyen matematiksel bir optimizasyon tekniğidir. Bu yaklaşım sayesinde, en elverişli koşulları tahmin etmek için ek deneylere veya benzeri çalışmalara gerek kalmaz, bu da optimizasyon sürecini kayda değer ölçüde hızlandırır (Yiga vd., 2021; Abd-El-Aziz vd., 2022; Szpisják-Gulyás vd., 2023).

Bu araştırmada, farklı bor bileşiklerinin (Çinkoborat (ÇB), Sodyum Tetraborat Dekahidrat (BD), Disodyum Oktaborat Tetrahidrat (ED) ve Dikalsiyum Hegzaborat Pentahidrat (EC)) kullanımıyla üretilen yongalevhaların mekanik performansları değerlendirilmiştir. Çalışmada, bu bileşiklerin levhaların MOR ve MOE olan etkileri yorumlanmıştır. Ayrıca deneysel sonuçlar, mekanik özelliklerin optimize edilmesi amacıyla RSM kullanılarak istatistiksel olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir.

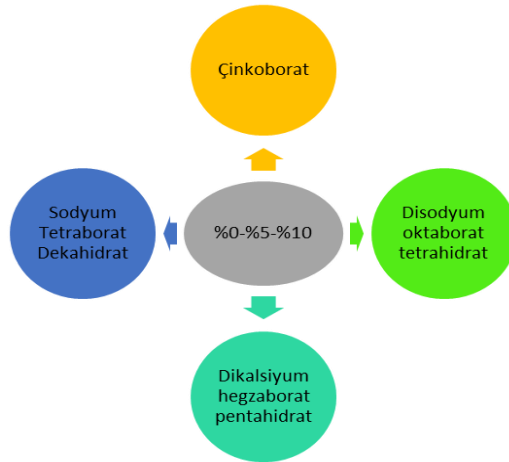
Materyal ve Yöntem

Yongalevha üretiminde kullanılan yongalar, Muğla ve Antalya yörelerinden temin edilen çeşitli ağaç türlerinin (karaçam, okaliptüs, kızılçam, fıstıkçamı, Halep çamı) karışımından oluşmaktadır. Bu yongalar, Orma A.Ş./Isparta fabrikasından tedarik edilmiştir. Üretim sürecinde, yongalar 102 ± 3 °C sıcaklıktaki kurutma fırınında nem oranı %3'e düşene kadar kurutulmuştur.

Bu çalışma kapsamında, hedef yoğunluğu $0,65 \text{ g/cm}^3$ olan üç katmanlı yongalevhalar üretilmiştir. Üretim sürecinin ilk

aşamasında, her bir bor türü için belirlenen oranlarda hazırlanan çözeltiler yongalara püskürtme yöntemiyle uygulanmıştır. Muamele edilen yongalar, nem oranları %3'e düşürülünceye kadar 102 ± 3 °C sıcaklıktaki kurutma fırınında bekletilmiştir. Kurutulmuş yongalar kullanılarak oluşturulan üç katmanlı levha taslağında, yonga miktarının %40'ı alt ve üst katmanlara, %60'ı ise orta katmana serilmiştir. Tutkal olarak üre-formaldehit (UF) kullanılmış olup, dış katmanlara %11, orta katmana ise %9 oranında uygulanmıştır. Hazırlanan levha taslakları, 160°C sıcaklıkta ve 20 N/mm² basınç altında 6 dakika süreyle sıcak preste preslenmiştir. Üretimden sonra, levhalar mekanik testler öncesinde 20°C sıcaklık ve %65 bağıl nem koşullarına sahip iklimlendirme odasında kondisyonlanmıştır. Deney tasarımı kapsamında her bir bor türü ve oranı için birer adet levha üretilmiş olup, tasarıma ilişkin detaylar Şekil 3'te sunulmuştur.

Şekil 3. Deneysel çalışma için hazırlanan tasarım



Çalışmada kullanılan UF tutkalının katı madde oranı %65, yoğunluğu ise 1,28 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Tutkal karışımına, sertleştirici olarak ağırlıkça %10 oranında amonyum klorür ilave edilmiştir. Bu prosesle 30x30x1 cm boyutlarında üretilen yongalevhaların MOR ve MOE değerleri, EN 310 (1993) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Nihai mekanik değerlerin

hesaplanması için her levhadan altı adet test numunesi alınmış ve ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması kullanılmıştır.

İstatistiksel Analiz

Deneysel verilerin matematiksel ve istatistiksel analizi için Design-Expert 11 StatEase 360 Trial bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Bu analizler, bir DoE tekniği olan Tepki RSM temel alınarak yürütülmüştür. Bu yaklaşım sayesinde, farklı bor türleri ve oranları gibi değişkenlerin deney sonuçları üzerindeki hem tekli hem de çoklu etkileri saptanarak bu ilişkileri tanımlayan matematiksel modeller geliştirilmiştir. Sonuç olarak, değişkenler ile çıktılar arasındaki bu karmaşık ilişki, Denklem 1’de formüle edilen yüksek dereceli bir polinom modeli aracılığıyla tahmin edilmiştir (Al-kahtani vd., 2023; Abdellatief vd., 2023).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (1)$$

Burada i doğrusal katsayı, j ikinci dereceden katsayı, X_i ve X_j bağımsız değişkenler, β regresyon sabiti olarak tanımlanır, β_0 modelin kesişme noktasıdır ve son olarak y ise modelin verdiği sonuçtur.

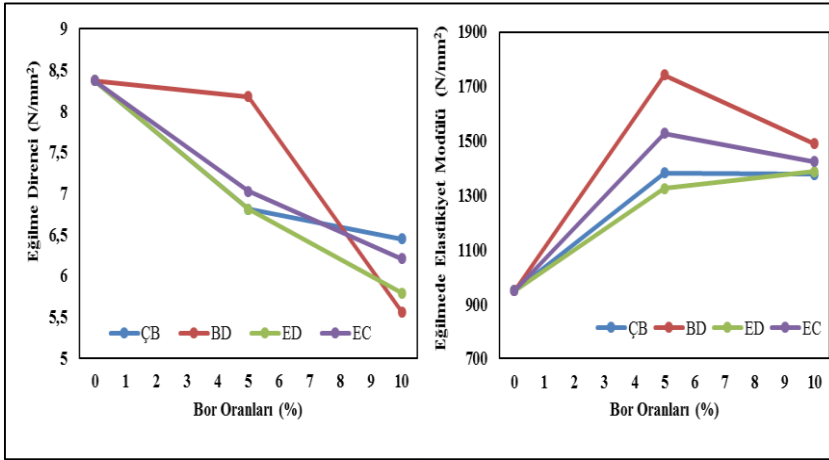
Ardından, seçilen model türü temel alınarak hem MOR hem de MOE modelleri için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Bu modellerin elde ettiği yüksek korelasyon katsayılarının (R^2) istatistiksel olarak da geçerli olduğunu doğrulamak amacıyla, ANOVA sonuçlarının anlamlılığı (p-değeri) ayrıca kontrol edilmiştir (Konitufe vd., 2023; Soltani vd., 2023).

Sonuçlar ve tartışma

Mekanik özellik sonuçları

Şekil 4, Farklı bor bileşikleri kullanılarak üretilen UF tutkallı levhaların MOR ve MOE göstermektedir. Araştırma bulgularına göre, levhaların MOR değerleri 5.79 ile 8.37 N/mm² arasında değişmekte olup, MOE değerleri ise 949.76 ile 1526.66 N/mm² aralığında tespit edilmiştir.

Şekil 4. Bor türlerine bağlı yonga levhaların mekanik özelliklerindeki değişim



MOR değeri, ahşap esaslı kompozit malzemelerin nihai yük taşıma kapasitesini ölçmektedir. Farklı bor bileşikleri kullanılarak üretilen levhaların MOR değerlerinde, bor oranı arttıkça azalma gözlemlenirken, MOE değerlerinde ise %5 bor oranından sonra azalma gerçekleşmiştir. %5 Disodyum oktaborat tetrahidrat oranında üretilen yongalevhaların MOE değerleri incelendiğinde, en düşük değer 1324.67 N/mm² olarak hesaplanırken, en yüksek değer %5 Dikalsiyum hegzaborat pentahidrat oranında üretilen yongalevhalar 1526.66 N/mm² olarak tespit edilmiştir. %10 Sodyum Tetraborat Dekahidrat oranında üretilen yongalevhaların

MOR deęerlerine bakıldığında, en dūřuk deęer 5.56 N/mm² olarak hesaplanmış, en yūksek deęer ise %5 Dikalsiyum hegzaborat pentahidrat oranında űretilen yongalevhelerde 7.03 N/mm² olarak belirlenmiřtir.

Borlu yongalevhelerin MOR deęerleri, bor oranının %5'ten %10'a çıkarılmasıyla űnemli űlűde azalmıřtır. Sodyum Tetraborat Dekahidrat takviyeli yongalevhelerde, MOR deęerinde en fazla azalma %32 oranında gűzlemlenmiřtir. Aynı bor tűrűnde MOE deęerlerinde ise yaklařık %21 oranında bir azalma kaydedilmiřtir. Bu sonuçlar, bor oranının artmasının yongalevhelerin mekanik űzellikleri űzerinde belirgin olumsuz etkiler yarattığını gűstermektedir.

Farklı bor tűrleri içeren yongalevhelerin MOR ve MOE deęerlerindeki azalmanın, asidik ve bazik karakterdeki kimyasalların odunun polisakkarit yapısında yol açtıęı bozunmadan kaynaklanabileceęi dűřűnűlmektedir. Bu bozunma, mekanik űzelliklerde azalmaya neden olmaktadır. Genel olarak, odun koruma endűstrisinde nűtr veya nűtre yakın pH deęerlerine sahip maddelerin tercih edilmesinin daha uygun olabileceęi űnerilmektedir (Bardak vd., 2011; Demir ve Aydın, 2016). Yapılan bařka bir çalıřmada ise, kullanılan bor bileřiklerinin baę yapmama űzellikleri nedeniyle dűřűk yapıřma performansı sergiledięi ve bu durumun mekanik űzelliklerde azalmaya yol açtıęı tespit edilmiřtir (Ųzdemir vd., 2018).

RSM ye gűre istatistiksel analiz sonuçları

Yongalevha numunelerinin hazırlanmasını optimize etmek amacıyla, dűrt baęımsız deęiřken ve ű seviyeli RSM deneysel tasarımına sahip ikinci dereceden polinom regresyon modeli kullanılmıřtır. Bu tasarım, farklı bor tűrlerinin (1.73, 2.41, 2.56, 2.71 g/cm³), deęiřen oranlarda (%0, %5, %10) UF'un matris olarak

kullanıldığı üretim koşullarını kapsamaktadır. Yapılan ANOVA analizine ait veriler ise Tablo 1'de sunulmuştur.

ANOVA analizlerinde F değerinin yüksek ve P değerinin düşük olması, modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir (Sadoun vd., 2018; Breig and Luti, 2021). Tablo 1'de verilen sonuçlara göre; MOR ve MOE'ye ilişkin F değerleri sırasıyla 24.15 ve 11.43 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek F değerleri, modelin genel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, söz konusu tepkilere ait P değerlerinin 0.05'ten küçük çıkması, modelin bu tepkiler üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin bulunduğunu göstermektedir (Sadoun vd., 2018). Öte yandan, P değerlerinin 0.1'in üzerinde olması durumunda modelde yer alan ilgili terimlerin anlamlı kabul edilmediği belirtilmektedir (Sathyamoorthy vd., 2017). Bu bağlamda, elde edilen F ve P değerleri, kurulan modellerin hem anlamlı hem de güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Table 1. İkinci dereceden model için girdilere bağlı çıktılar

ANOVA analizi

	Source	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
MOR	Model	10,56	2,11	24,15	< 0.0001
	A-BT	0,5282	0,5282	6,04	0,0338
	B-BO	9,69	9,69	110,81	< 0.0001
	AB	0,0374	0,0374	0,4272	0,5281
	A ²	0,1247	0,1247	1,43	0,2599
	B ²	0,0506	0,0506	0,5790	0,4643
	Lack of Fit	0,8745	0,1749		
	Cor Total	0,0000	0,0000		
MOE	Model	6,705E+05	1,341E+05	11,43	0,0007
	A-BT	9639,74	9639,74	0,8219	0,3860
	B-BO	3,305E+05	3,305E+05	28,18	0,0003
	AB	2564,40	2564,40	0,2186	0,6501
	A ²	15414,11	15414,11	1,31	0,2783
	B ²	2,534E+05	2,534E+05	21,61	0,0009
	Lack of Fit	1,173E+05	23457,79		
	Cor Total	0,0000	0,0000		

BT: Bor türü, BO: Bor oranı

Ayrıca, MOR ve MOE için standart sapma değerleri varyans katsayıları ve R² değerleri Tablo 2'de verilmiş olup, bu parametreler modelin doğruluğu ve güvenilirliği üzerindeki etkinlikleri hakkında ek bilgi sağlamıştır.

Tablo 2’de sunulan çeşitli istatistiksel ölçütler doğrultusunda, Tablo 1’de yer alan modellerin istatistiksel yeterlilikleri değerlendirilmiştir. Modellerin tahmin performansı, regresyon kareleri toplamının genel kareler toplamına oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Elde edilen R² değerleri; MOR ve MOE modelleri için sırasıyla %92.35 ve %85.11 olarak belirlenmiştir. Bu yüksek R² değerleri, literatürde belirtildiği üzere (Sadoun vd., 2018; Yaghoobi vd., 2018), modellerin verilerle yüksek uyum içinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Tablo 2’de yer alan ayarlanmış R² değerlerinin de benzer şekilde yüksek olması, modellerin istatistiksel

olarak anlamlı ve güvenilir olduğunu desteklemektedir (Mustafa vd., 2020; Breig and Luti, 2021).

Modellerin yeterli kesinlik değerleri ise sırasıyla 15.8196 ve 9.3014 olarak bulunmuştur. Bu ölçüt, modelin sinyal-gürültü oranını temsil eder ve değerın 4'ün üzerinde olması, modelin yeterli ayırım gücüne ve güvenilirliğe sahip olduğunu göstermektedir (Sadoun vd., 2018; Majdi vd., 2019; Chananipoor vd., 2021).

Table 2. ANOVA analiz sonuçlarına ilişkin istatistiksel bilgiler

	C.V. %	R ²	Ayarlanmış R ²	Yeterli kesinlik
MOR	4.13	0.9235	0.8853	15,8196
MOE	8.37	0.8511	0.7767	9.3014

Deneyisel verilerin yüksek doğruluk ve güvenilirliğe sahip olması için varyasyon katsayısının (CV) düşük olması gerektiği literatürde vurgulanmıştır (Chananipoor et al., 2021). Bununla birlikte, standart sapma değerleri de çalışma bulgularının değerlendirilmesinde önemli bir istatistiksel kriter olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada MOR ve MOE değerleri için elde edilen CV değerleri sırasıyla %4.13 ve %8.37 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, MOR ve MOE verilerinin istatistiksel açıdan güvenilir olduğu değerlendirilmiştir.

Optimizasyon

Üretilen yongalevhaların formülasyonu; MOR ve MOE gibi temel performans parametrelerini en üst düzeye çıkarmak amacıyla optimize edilmiştir. Bu kapsamda, farklı bor bileşiklerinin (Çinkoborat, Sodyum Tetraborat Dekahidrat, Disodyum oktaborat tetrahidrat ve Dikalsiyum hegzaborat pentahidrat) çeşitli oranlarda (%0, %5, %10) kullanılması ile oluşturulan tasarım, tüm çıktılar üzerinde eşzamanlı optimizasyon yapılmasına olanak tanımıştır. Bu çok değişkenli optimizasyon yaklaşımı, Tablo 3 ve Tablo 4'de

sunulan veriler doğrultusunda, en uygun bor türü ve bor oranının belirlenmesini sağlamıştır.

Tablo 3. Optimizasyon özellikleri

Parametreler	Amaç	Alt Limit	Üst Limit
A: Bor Türü	Belirlenen Hedefler	1.73	2.71
B: Bor Oranı	Belirlenen aralıklar	0	15

Çinkoborat: **2.71**, Sodyum Tetraborat Dekahidrat: **1.73**, Disodyum oktaborat tetrahidrat: **2.41**, Dikalsiyum hegzaborat pentahidrat: **2.56**

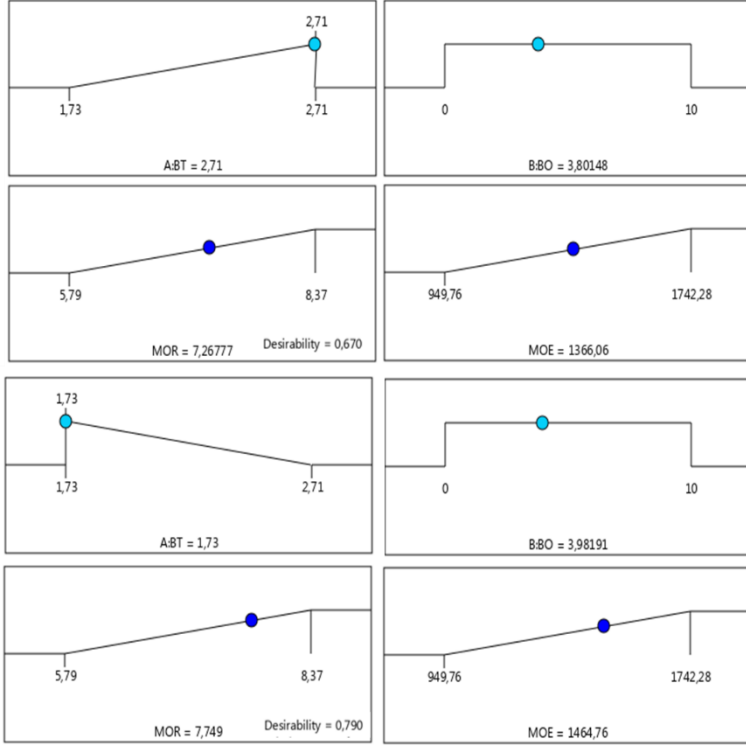
Tablo 4. Optimizasyon kriterleri

Response	Amaç	Alt Limit	Üst Limit	Önem derecesi
MOR	Maximum değerler	5.56	8.37	5
MOE	Maximum değerler	949.76	1742.28	5

MOR ve MOE, yongalevhaların uzun süreli yapısal performanslarını ve dayanıklılıklarını belirlemede kritik öneme sahip parametreler olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle, optimizasyon sürecinde en yüksek önem derecesi olarak ele alınmışlardır. Özellikle MOR ve MOE değerleri, yongalevhanın yük taşıma kapasitesini doğrudan etkileyen ve levhanın hem güvenliğini hemde uzun ömürlü kullanımını sağlayan mekanik özellikler olarak öne çıkmaktadır (Melichar vd., 2021).

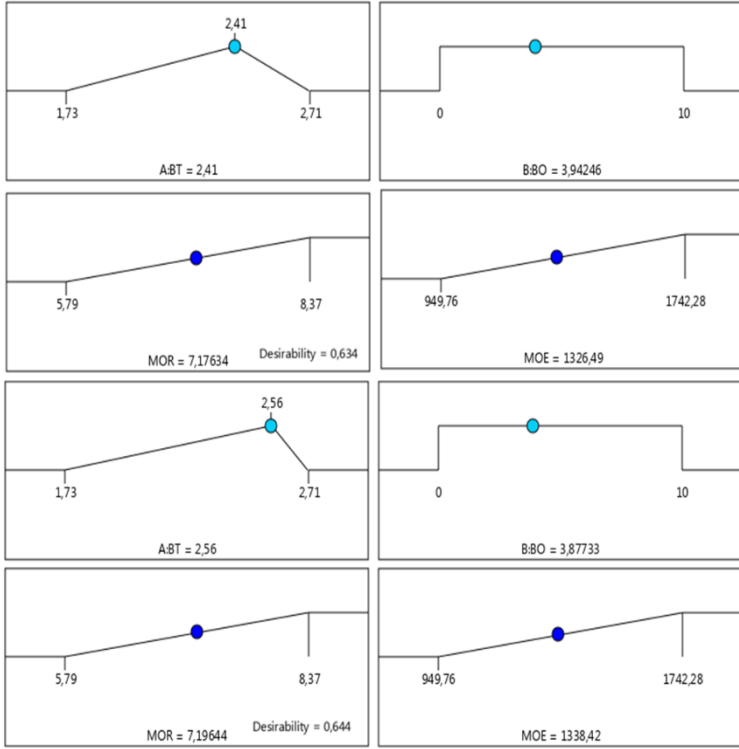
İstenirlik analizi sonucunda elde edilen dört adet optimum çözüm Şekil 5 ve Şekil 6'da sunulmuştur. Sodyum Tetraborat Dekahidrat katkısının %3.98 oranında kullanıldığı analizde, en yüksek performans değerlerine ulaşıldığı belirlenmiş ve bu kombinasyon 0,79 gibi en yüksek istenirlik değeriyle öne çıkmıştır (Şekil 5). Bu parametreler altında; MOR değeri 7.75 N/mm², MOE değeri ise 1469.76 N/mm² olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5. Çinkoborat ve Sodyum Tetraborat Dekahidrat katkılı yongalevhaların üretim optimizasyonu.



Çinkoborat katkısının %3.80 oranında kullanıldığı analizde ise, belirtilen oran en uygun formülasyon olarak belirlenmiş ve bu kombinasyon 0,67 istenirlik değeriyle değerlendirilmiştir (Şekil 5). Bu koşullarda; MOR değeri 7.26 N/mm², MOE değeri ise 1366.06 N/mm² olarak elde edilmiştir.

Şekil 6. Disodyum oktaborat tetrahidrat ve Dikalsiyum hegzaborat pentahidrat katkılı yongalevhaların üretim optimizasyonu.



Disodyum oktaborat tetrahidrat katkısının yer aldığı analizde %3.94 bor oranı en uygun formülasyon belirlenmiş olup 0,63 istenirlik değeriyle optimize edilmiştir (Şekil 6). Bu parametreler doğrultusunda; MOR değeri 7.17 N/mm², MOE değeri ise 1326.49 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Dikalsiyum hegzaborat pentahidrat katkısının yer aldığı analizde ise, %3.87 bor oranı en uygun formülasyon belirlenmiş olup 0,64 istenirlik değeriyle optimize edilmiştir (Şekil 6). Bu parametreler doğrultusunda; MOR değeri 7.19 N/mm², MOE değeri ise 1338.42 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Genel olarak belirlenen bu formülasyonlar dikkate alındığında, farklı bor bileşiklerinin kullanılması bazı avantajlar

sunmakta ve bu avantajlar hedeflemek istediğimiz performans kriterlerine göre malzeme tasarımında esneklikler sağlamıştır.

Sonuç

Bu çalışma bor bileşiklerinin yongalevha üretiminde mekanik performans üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Bulgular, bor oranı arttıkça eğilme MOR değerinin azaldığını, MOE değerinin ise orta düzey katkılarda arttığını göstermiştir. Disodyum Oktaborat Tetrahidrat ve Dikalsiyum Hegzaborat Pentahidrat yüksek MOE değerleriyle öne çıkarken, genel performans açısından en uygun katkı Sodyum Tetraborat Dekahidrat olarak belirlenmiştir. En yüksek MOR kaybı %10 Sodyum Tetraborat Dekahidrat katkısında %33, en düşük ise %10 çinkoborat katkısında %22 olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık, MOE’de en yüksek artış %5 Sodyum Tetraborat Dekahidrat katkısında %83, en düşük artış ise %10 çinkoborat katkısında %45 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, uygun bor bileşiği türü ve oranının seçiminin yongalevha malzemelerinin mekanik özelliklerini iyileştirmede kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

RSM analizleri ve optimizasyon sonuçları ise, %3–4 aralığında bor kullanımıyla malzeme performansının iyileştirilebileceğini göstermiştir. Genel olarak, bor bileşiklerinin uygun oranlarda kullanımı yongalevhaların mekanik dayanımını optimize edebilmekte, aşırı dozaj ise bağ yapısında bozulmaya neden olarak olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu kapsamda çalışma, bor katkılarının ahşap esaslı kompozitlerde kontrollü ve optimize edilmiş biçimde kullanımının hem sürdürülebilir üretim hem de performans açısından önemli potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır.

Kaynakça

Abd-El-Aziz, N. M., Hifnawy, M. S., El-Ashmawy, A. A., Lotfy, R. A., & Younis, I. Y. (2022) Application of Box-Behnken design for optimization of phenolics extraction from *Leontodon hispidulus* in relation to its antioxidant, anti-inflammatory and cytotoxic activities. *Scientific Reports*, 12(1), 8829. Doi: 10.1038/s41598-022-12642-2

Abdellatief, M., Elemam, W. E., Alanazi, H., & Tahwia, A. M. (2023) Production and optimization of sustainable cement brick incorporating clay brick wastes using response surface method. *Ceramics International*, 49(6), 9395-9411. Doi: 10.1016/j.ceramint.2022.11.144

Akbulut, T., & Ayrılmış, N. (2024) *Yongalevha Endüstrisi Particleboard Industry*. Iuc Press.

Al-Kahtani, M. S. M., Zhu, H., Haruna, S. I., & Shao, J. (2023) Evaluation of mechanical properties of polyurethane-based polymer rubber concrete modified ground glass fiber using response surface methodology. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(4), 4695-4710. Doi: 10.1007/s13369-022-07112-w

Bacigalupe, A., & Escobar, M. M. (2021) Soy protein adhesives for particleboard production—a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 2033-2045. Doi: 10.1007/s10924-020-02036-8

Baharoğlu, M., Nemli, G., Sarı, B., Birtürk, T., & Bardak, S. (2013) Effects of anatomical and chemical properties of wood on the quality of particleboard. *Composites Part B: Engineering*, 52, 282-285. Doi: 10.1016/j.compositesb.2013.04.009

Bardak, S., Nemli, G., & Bardak, T. (2019) The quality comparison of particleboards produced from heartwood and

sapwood of European larch. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 21(4), 511-520. Doi: 10.4067/S0718-221X2019005000407

Bardak, S., Yel, H., Bakır, D., & Peker, H. (2011) Emprenye maddelerinin okalıptüs (*eucalyptus camaldulensis dehn.*) odununun fiziksel özelliklerine etkileri.

Breig, S. J. M., & Luti, K. J. K. (2021) Response surface methodology: A review on its applications and challenges in microbial cultures. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2277-2284. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.316

Chananipoor, A., Azizi, Z., Raei, B., & Tahmasebi, N. (2021) Synthesis and Optimization of GO/PMMA/n-Octadecane Phase Change Nanocapsules Using Response Surface Methodology. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 40(2), 383-394.

Demir, A., & Aydın, İ. (2016) Yangın geciktirici kimyasal maddeler ile emprenye işleminin odun ve odun esaslı malzemelerin teknolojik özellikleri üzerine etkileri. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 12(1), 96-104.

Europanel (2024). European Panel Federation 2024. (20/10/2025 tarihinde <https://europanel.org/the-wood-based-panel-industry/types-of-wood-based-panels-economic-impact/particleboard/> adresinden ulaşılmıştır).

Farrokhpayam, S. R., Valadbeygi, T., & Sanei, E. (2016) Thin particleboard quality: effect of particle size on the properties of the panel. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 13, 38-43. Doi: 10.1007/s13196-016-0163-9

Ferreira, N., Viana, T., Henriques, B., Tavares, D. S., Jacinto, J., Colónia, J., ... & Pereira, E. (2023) Application of response surface methodology and box-behnken design for the optimization

of mercury removal by *Ulva* sp. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130405. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130405

Hosseini, S. M., & Fadaei, M. (2013) Properties of Particleboard Made from UF with Low-formaldehyde (E1). *International Journal of Engineering*, 26(1), 45-50.

Jiang, W., Adamopoulos, S., Hosseinpourpia, R., Žigon, J., Petrič, M., Šernek, M., & Medved, S. (2020) Utilization of partially liquefied bark for production of particleboards. *Applied Sciences*, 10(15), 5253. Doi: 10.3390/app10155253

Konitufe, C., Baba, A. S., & Abubakar, A. (2023) Optimization of Calcined Termite-Mound Material (CTM) Mortar and Concrete using Response Surfaces Methodology. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 14(02), 047-060. Doi: 10.30574/gjeta.2023.14.2.0020

Lee, S. H., Lum, W. C., Boon, J. G., Kristak, L., Antov, P., Pędzik, M., & Pizzi, A. (2022) Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 4630-4658. Doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.166

Mahmoud, B. S., & McConville, C. (2023) Box–Behnken design of experiments of polycaprolactone nanoparticles loaded with irinotecan hydrochloride. *Pharmaceutics*, 15(4), 1271. Doi: 10.3390/pharmaceutics15041271

Majdi, H., Esfahani, J. A., & Mohebbi, M. (2019) Optimization of convective drying by response surface methodology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 574-584. Doi: 10.1016/j.compag.2018.12.021

Melichar, T., Bydzovsky, J., Dvorak, R., Topolar, L., & Keprdova, S. (2021) The behavior of cement-bonded particleboard

with modified composition under static load stress. *Materials*, 14(22), 6788. Doi: 10.3390/ma14226788

Mustafa, Z., Idrus, N. H., Hadzley, A. B. M., Sivakumar, D., Norazlina, M. Y., Fadzullah, S. H. S. M., ... & Thongkaew, K. (2020) Optimization of drilling process parameters on delamination factor of Jute reinforced unsaturated polyester composite using Box-Behnken design of experiment. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(1), 6295-6303. Doi: 10.15282/jmes.14.1.2020.08.0493

Nemli, G., Aydın, I., & Zeković, E. (2007) Evaluation of some of the properties of particleboard as function of manufacturing parameters. *Materials & Design*, 28(4), 1169-1176. Doi: 10.1016/j.matdes.2006.01.015

Owodunni, A. A., Lamaming, J., Hashim, R., Taiwo, O. F. A., Hussin, M. H., Mohamad Kassim, M. H., & Hiziroglu, S. (2020) Adhesive application on particleboard from natural fibers: A review. *Polymer Composites*, 41(11), 4448-4460. Doi: 10.1002/pc.25749

Özdemir, F., Özyurt, H., Dalgıç, E., Ramazanoğlu, D., & Tutuş, A. (2018) Muskovit Minerali Eklenecek Üretilen Yüksek Yoğunluklu Lif Levhaların (HDF) Yüzey Kalitesinin Araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 166-171.

P. Whitcomb, T. Helseth, M. Anderson, Stat-Ease 360 software (Trial Version), Minneapolis (2021).

Sadoun, O., Rezgui, F., & G'Sell, C. (2018) Optimization of valsartan encapsulation in biodegradable polyesters using Box-Behnken design. *Materials science and engineering: C*, 90, 189-197. Doi: 10.1016/j.msec.2018.04.041

Sathyamoorthy, N., Magharla, D., Chintamaneni, P., & Vankayalu, S. (2017) Optimization of paclitaxel loaded poly (ϵ -

caprolactone) nanoparticles using Box Behnken design. Beni-Suef University journal of basic and applied sciences, 6(4), 362-373. Doi: 10.1016/j.bjbas.2017.06.002

Shi, L., Hu, C., Zhang, W., Chen, R., Ye, Y., Fan, Z., & Lin, X. (2024) Effects of adhesive residues in wood particles on the properties of particleboard. *Industrial Crops and Products*, 214, 118526. Doi: 10.1016/j.indcrop.2024.118526

Soltani, M., Moayedfar, R., & Vun, C. V. (2023) Using response surface methodology to assess the performance of the pervious concrete pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(3), 576-591. Doi: 10.1007/s42947-021-00149-4

Szpisják-Gulyás, N., Al-Tayawi, A. N., Horváth, Z. H., László, Z., Kertész, S., & Hodúr, C. (2023) Methods for experimental design, central composite design and the Box–Behnken design, to optimise operational parameters: A review. *Acta Alimentaria*, 52(4), 521-537. Doi: 10.1556/066.2023.00235

Yaghoobi, H., & Fereidoon, A. (2018) Modeling and optimization of tensile strength and modulus of polypropylene/kenaf fiber biocomposites using Box–Behnken response surface method. *Polymer Composites*, 39, E463-E479. Doi: 10.1002/pc.24596

Yiga, V. A., Lubwama, M., Pagel, S., Olupot, P. W., Benz, J., & Bonten, C. (2023) Optimization of tensile strength of PLA/clay/rice husk composites using Box-Behnken design. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(13), 11727-11753. Doi: 10.1007/s13399-021-01971-3

BÖLÜM 6

KARBON NANOTÜPLERİN LİGNOSELÜLOZİK KOMPOZİT MALZEMESİNDE KULLANIMI

1. Muhammed Zakir TUFAN¹

2. Birol ÜNER²

Giriş

İnsanoğlu dünyaya geldiğinden beri hiçbir zaman kendi elindeki mevcut olan olanaklarla yetinmemiş ve hep var olanın daha iyisini nasıl yapabilirim düşüncesiyle hareket etmiştir. Bu mevcut düşüncenin geniş anlamda daha kolay gerçekleştirilme olanağı bulması dünyada teknolojinin gelişmesiyle beraber hızlanmıştır. İlk başlarda maddeler makroskobik boyutlarda incelenip dizayn edilirken teknolojik gelişmelerle beraber buna mikroskobik incelemelerde dâhil olmuştur. Bu son gelişmeyle beraber bilim adamları malzemeyi oluşturan en küçük oluşuma etki yapabilme olanağı bulmuş bunun sonucunda farklı özellikte yeni maddeler ortaya çıkartıp üretebilmişlerdir. Nanoteknoloji de bu gelişmelerle beraber ortaya çıkmış bir kavramdır. Bu kavramla ilgili yapılan çalışmalarda ilerleme kaydedildikçe malzemeyi oluşturan atomların

¹ Dr, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, 0000-0002-6110-7018

² Prof. Dr, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, 0000-0001-9249-7402

seviyesine inilmiş, bu alanda düzenlemeler gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bunun sonucunda birçok farklı özellikte ürünler üretilmeye başlanmıştır. Nanoteknolojik çalışmalar sonucunda ortaya çıkan bu ürünlerden biride karbon nanotüptür. Karbon nanotüp (KNT) sahip olduğu kimyasal, mekanik, fiziksel vb birçok özellikleri ile bugün yapılan bilimsel çalışmalarda birçok bilim adamı tarafından yoğun olarak kullanılmaktadır (Syduzzaman vd., 2025).

Nanoteknoloji

Nane ölçek, nanoteknolojiyi tanımlarken kullanılan temel bir kavramdır. Bu kapsamda nanoteknoloji; atomik ve moleküler seviyelerde, yaklaşık 1-100 nm boyut aralığında çalışarak, yeni özellikler ve işlevler kazandırılmış malzeme, aygıt ve sistemlerin anlaşılması ve tasarlanması süreci olarak ifade edilmektedir (Bowman ve Hodge, 2006; Stevens vd., 2009; Cacciatore vd., 2011; Jasmani vd., 2020; Pramanik vd., 2020; Haleem vd., 2023).

Yunancada “nano” kelimesi cüce anlamına gelmekte olup, fiziksel büyüklüğün milyarda birini (10^{-9} m) ifade etmektedir. Nanoteknoloji, metrenin milyarda biri ölçeğindeki ($1\text{nm}= 10^{-9}$ m) yapılarla ilgilenir ve maddenin bu boyutlardaki özelliklerini incelemektedir (Poole ve Owens, 2003; Ibrahim, 2013; Bayda vd., 2019). Atomik düzeyde gerçekleştirilen iyileştirmeler, özel bilimsel amaçlarla geliştirilmiş araçların yardımıyla yapılmaktadır. Bu alandaki gelişmelerin yaygınlaşarak popülerlik kazanması ise özellikle son yıllarda gerçekleşmiştir (Ibrahim, 2013; Syduzzaman vd., 2025).

Nanoteknoloji terimi ilk kez 1974 yılında Japon bilim insanı Norio Taniguchi tarafından kullanılmaya başlanmıştır (Kazlev, 2003; Ibrahim, 2013; Bayda vd., 2019). Taniguchi'ye göre nanoteknoloji; malzemelerin bir atom ya da bir molekül düzeyinde ayrıştırılması, birleştirilmesi ve şekillendirilmesi gibi işlem

basamaklarını kapsamaktadır. Günümüzde nanoteknoloji, malzemelerin yapılarını ve özelliklerini ortaya çıkaran geniş bir bilim alanı olarak kabul edilmektedir (Ibriahim, 2013; Bayda vd., 2019).

Nanoteknolojinin Tarihi

Nanoteknoloji alanında meydana gelen gelişmeler 1958'de başlamıştır. Nanoteknolojinin bu tarihten itibaren geçirdiği çeşitli gelişim aşamaları Tablo 1'de özet halinde verilmiştir.

Tablo 1. Nanoteknolojinin Periyodik Gelişimi

YILLAR	NANOTEKNOLOJİDE MEYDANA GELEN GELİŞMELER
1959	R.Feynman nanoteknoloji hakkındaki ilk düşünme süresini başlattı.
1974	Nanoteknoloji terimi ilk kez Taniguchi tarafından kullanıldı.
1981	Taramalı tünelleme mikroskobu keşfedildi.
1985	“Bucky Ball” (60 karbon atomu içeren ve futbol topu benzeri bir kafes oluşturan yapıyı oluşturur).
1986	• Atomik Kuvvet Mikroskobu, K. Eric Drexler tarafından Yaratılış Motorları üzerine ilk kitap yayınlandı. • Atomik Kuvvet Mikroskobu bulundu.
1989	IBM logosu tek tek atomlar bir araya getirilerek yapıldı
1991	S. Iijima, ilk defa karbon nanotüpü keşfetti.
1999	R. Freitas tarafından “nano tıp” kitabı yayınlandı
2000	İlk defa Ulusal Nanoteknoloji Girişimi başlatıldı
2001	Nanometre ölçekli elektronik cihaz teorisi geliştirmek, karbon nanotüplerin ve nano tellerin sentezi ve karakterizasyonları için, Nanoteknoloji alanında Feynman Ödülü layık görüldü.

2002	Yeni yapıların kendi kendine montajını ve moleküler makine sistemlerini modelleme yeteneğimizi geliştirmeyi DNA'yı kullanarak sağladığı için Feynman'a nanoteknoloji ödülü verildi.
2003	Nanoteknoloji Feynman Ödülü, yeni malzemelerin moleküler ve elektronik yapılarının modellenmesi ve tek molekülli biyolojik motorların nano ölçekli silikon cihazlarla entegrasyonu için verildi.
2004	Gelişmiş nanoteknoloji ile ilgili ilk politika geliştirme konferansı düzenlendi. Nano mekanik sistemler için ilk merkez kuruldu, Nanoteknolojide Feynman Ödülü, kararlı protein yapıları tasarlamak ve değiştirilmiş bir işlevi olan yeni bir enzim oluşturulduğu için verildi.
2005-2010	Robotik, 3D ağ gibi 3D Nano sistemler ve kullanım sırasında durumlarını değiştiren aktif nano ürünler hazırlandı.
2011	Moleküler nano teknoloji dönemi başladı.

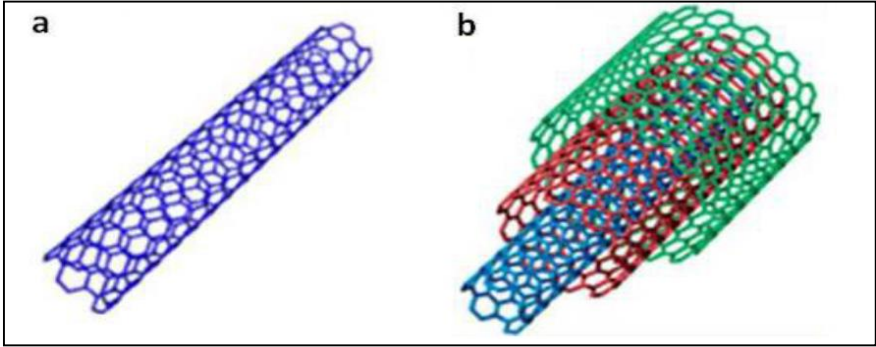
Kaynak: (Nikalje, 2015; Bayda vd., 2019; Ahire vd., 2022)

Karbon Nanotüp

1991 yılında Japon bilim insanı Iijima tarafından keşfedilen uzun, ince ve içi boş silindir yapısındaki KNT'ler, günümüzde hem akademik araştırmalarda hem de çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Taczak, 2007; Szabo vd., 2010; He vd., 2013; Rathinavel vd., 2021; Syduzzaman vd., 2025). Karbonun allotroplarından biri olan bu nanomalzemeler, grafitten üretilmiş olup 1.000.000'dan daha yüksek uzunluk-çap oranına sahiptir (He vd., 2013; Pandey ve Dahiya, 2016; Dubey vd., 2021). Boyutları, şekilleri ve dikkat çekici fiziksel özellikleri bakımından benzersiz makromoleküller olan nanotüpler, silindir biçimine sarılmış altıgen kafes yapılı bir grafit levha olarak düşünülebilir. Son yıllarda bu ilginç yapılar yoğun ilgi görmüş ve yapıları ile özellikleri üzerine çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir. Halen fiziksel özelliklerinin keşfine yönelik çalışmalar sürmekte olup, bilim

insanları arasında tartışma konusu olmaya devam etmektedir. Ayrıca nanotüpler; çap, uzunluk ve kirallik(bükülme) gibi yapısal farklılıklara bağlı olarak geniş bir elektronik, termal ve mekanik özellikler yelpazesine sahiptir (Venkataraman vd., 2019; Anzar vd., 2020).

Şekil 1. a)TDKNT, b) ÇDKNT



Kaynak: (Pitroda vd., 2016)

KNT'ler, sahip oldukları bu özellikler nedeniyle fizikçiler, kimyagerler, malzeme bilimciler ve elektronik cihaz mühendisleri tarafından büyük ilgi görmüştür (Suzuki, 2013; He vd., 2013; Camilli ve Passacantando, 2018). Bu ilgiye paralel olarak, KNT'ler üzerine yapılan araştırmalar yoğunlaştıkça, elektronik, optik, plastik, kompozit malzemeler ve diğer nanoteknoloji alanlarında katkı maddesi olarak kullanım imkanı da giderek artmıştır (Thostenson vd., 2001; He vd., 2013; Ibrahim, 2013; Fenta vd., 2024). Grafen tabakalarının sayısına bağlı olarak, KNT'ler, iki kategoriye ayrılmaktadır: tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT'ler) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT) olmak üzere iki farklı kategoriye ayrılmaktadır (He vd., 2013; Venkataraman vd., 2019). TDKNT lerin çapları 0.4-2 nm arasında değişirken, uzunlukları 20-

1000 nm aralığında olabilmektedir. Yapısal olarak sandalye, zikzak, kiral ya da sarmal formda bulunabilen TDKNT'lerin özellikleri bu formlara bağlı olarak farklılık göstermektedir. ÇDKNT'lerin çapları ise 4-100 nm uzunlukları ise 1-50 µm arasında değişmektedir (Mehra vd., 2008; Pandey ve Dahiya, 2016; Murjani vd., 2022). Bu iki kategoriye ait nanotüplerin görünüşleri Şekil 1’de, özellikleri ise Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. TDKNT ve ÇDKNT lerine ait özelliklerin karşılaştırılması

TDKNT	ÇDKNT
Tek grafen katmanından oluşmaktadır.	Birden fazla grafen katmanının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır.
Sentezi için katalizör gereklidir.	Katalizör olmadan üretilebilir.
Toplu sentez zordur	Toplu sentez kolaydır
Kullanımı sırasında daha fazla kusur meydana gelir	Kullanımı sırasında daha az kusur gelmesine rağmen, ancak ortaya çıkan bu kusurların iyileştirilmesi zordur
Saflık derecesi düşüktür	Saflık derecesi yüksektir
Kullanılan malzemede daha az birikmeye (topaklaşma) neden olur	Kullanılan malzemede daha çok birikmeye (topaklaşma) neden olur
Karakterizasyon ve ölçüm işlemleri daha kolay yapılabilir.	Karakterizasyon ve ölçüm işlemleri daha zor yapılabilir.
Bükülmeleri kolay bir şekilde yapılabilir.	Bükülmeleri zor bir şekilde yapılabilir.

Kaynak: (Eatemadi vd., 2014; Sarangdevot ve Sonigara, 2015; Pitroda vd., 2016)

KNT’lerin avantajları (Pitroda vd., 2016)

- KNT son derece küçük ve hafif yapıları sayesinde metalik tellerin yerine kullanılabilir.

- Küçük boyutları ve düşük yoğunlukları ile yüksek verimlilik sağlamaktadır.
- Yüksek yüzey alanına sahip olup mükemmel kimyasal kararlılık göstermektedir.
- Üretimleri için gerekli kaynaklar bol bulunmakta ve çok az miktarda materyal kullanılarak üretilebilmektedir.
- Sıcaklık değişimlerine karşı dirençleri yüksektir; hem aşırı soğukta hem de aşırı sıcakta işlevlerini yerine getirebilmektedir.
- Kompozit malzemelerin iletkenlik ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilmektedir.

KNT'lerin dezavantajları (Pitroda vd., 2016; Dubey vd., 2021)

- Yoğun araştırmalara rağmen KNT'lerin çalışma mekanizmaları tam olarak netleştirilememiştir.
- KNT'lerin son derece küçük boyutlara sahip olması, onlarla çalışmayı oldukça zorlaştırmaktadır.
- Günümüzde KNT üretim maliyetleri hala oldukça yüksektir.
- Bu yeni teknolojinin geleneksel teknolojilerin kullanıldığı alanlarda uygulanması, maliyet açısından önemli bir yük getirmektedir.

Karbon Nanotüplerin  zellikleri

Mekanik  zellikler

KNT'lerin kimyasal bağları (kovalent) tamamen sp^2 C-C (uzaklık yaklaşık 0.14 nm) bağlarından oluşmaktadır. Elmasta bulunan sp^3 C-C (uzaklık yaklaşık 0.15 nm) bağlarına nazaran daha g   l  olan bu bağ yapısı KNT'lere son derece yüksek mekanik özellikler kazandırmaktadır (Rashko vd., 2022; Maheswaran and Shanmugavel, 2022) . KNT'lerin küçük boyutları ve k   lelerinden dolayı, mekanik özellikleri mevcut herhangi bir malzeme özelliği ile karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin daha iyi olduğu yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. KNT'lerin mekanik özellikleri konusunda ortak bir fikir birliği olmamasına rağmen, yapılan teorik ve deneysel verilere göre, Young mod    1.2 TPa kadar bir değer elde edilirken, çekme dayanımında ise 50–200 GPa'lık bir değer elde edilmiştir. Bu sonuçlar bize KNT'lerin (Suzuki, 2013; Dubey vd., 2021; Maheswaran and Shanmugavel, 2022) olağandışı mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Bu değerler KNT'leri dünyadaki en g   l  ve en sert malzemeler yapar. Aynı zamanda KNT'lerin fiziksel özelliklerinde (elektriksel ve termal iletkenlikleri açısından) de bu kapsamda önemli değerler elde edilmiştir (Ibrahim, 2013; Suzuki, 2013; He vd., 2013; Varshney, 2014; Camilli ve Passacantando 2018; Rashko vd., 2022). KNT'lerin farklı malzeme özellikleriyle karşılaştırılması ise Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. KNT'lerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin farklı malzemelerle karşılaştırılması

MALZEMELER	YOUNG MODÜLÜ (GPa)	ÇEKME DİRENCİ (GPa)	YOĞUNLUK (g/cm ³)
TDKNT	1054	150	0.7-1.7
ÇDKNT	1200	150	2.6
Çelik	208	0.4	7.8
Epoksi	3.5	0.005	1.25
Kevlar	60	3.6	1.44
Cam lifi	22	3.4	2.6

Kaynak: (Eklund vd., 2007; Varshney, 2014)

Termal Özellikler

Rulo şeklindeki grafitli yapılar olarak bilinen KNT'ler sadece sahip oldukları mekanik özellikleri için değil aynı zamanda termal özellikleri için de büyük önem ve uygulama alanına sahiptir (Ruoff ve Lorents, 1995; Ibrahim, 2013; Shoukat ve Khan, 2021). KNT'ler de bulunan atomlar arasındaki bağların güçlü olması, yüksek sıcaklıklara dayanmalarını sağlar. Bu nedenle, KNT'lerin çok iyi termal iletkenler olduğu belirlenmiştir. KNT'ler ısının iletilmesinde yaygın olarak kullanılan bakır tellerle karşılaştırıldığında, 15 katdan daha fazla bir miktarda iletebilir. KNT'lerin termal iletkenliği, tüplerin sıcaklığına ve dış ortama bağlıdır (Ruoff ve Lorents, 1995).

KNT sistemlerinin özgül ısı ve ısı iletkenliği temel olarak fononlar tarafından belirlenir (Khare ve Bose, 2005). Fonon-aktif modların sayısı, fononların hareket edebileceği serbest yolun uzunluğu ve yüzey saçılması için gerekli sınır değerleri gibi termal özellikleri etkileyen birkaç faktör vardır (Maultzsch vd., 2002; Yu vd., 2005; Ibrahim, 2013). Bu özellikler ayrıca atomların düzenlenme biçimine, tüplerin çapına ve uzunluğuna, yapıda var olan mevcut yapısal kusurların sayısına ve morfolojisine ve ayrıca

KNT'lerdeki safsızlık varlığına da bağlıdır (Maeda ve Horie, 1999; Popov, 2004; Ibrahim, 2013).

KNT'lerin oda sıcaklığında $6000 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ değerine kadar iletkenlik özelliği gösterdiği tahmin edilmektedir. Ancak iyi termal iletkenliğe sahip olduğu bilinen bakırın iletkenlik değeri ise $385 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ dır. KNT'lerin sıcaklık stabilitesinin vakum ortamında 2800°C ve havada ise yaklaşık 750°C kadar olduğu tahmin edilmektedir. KNT'lerin termal genleşmesi, büyük ölçüde anizotropik olan geleneksel grafit liflerinden farklı olup, büyük ölçüde izotropik olacaktır. Bu karbon-karbon kompozitleri için avantaj olabilir. Yapısında düşük oranlarda kusurlar bulunan KNT'lerin çok düşük termal genleşme katsayılarına sahip olması beklenir (Varshney, 2014; Pitroda vd., 2016).

Kimyasal Özellikler

Bir KNT'nin kimyasal reaktifliğinde, KNT yüzeyinin eğri olmasından dolayı bir grafen levhayla karşılaştırıldığında artış meydana gelmiştir. Bu eğrilik π ve σ orbitalin karışmasına neden olur. Bu eğrilik sonucunda orbitaller arasında hibritleşmeye meydana gelir. Bir KNT çeşidi olan TDKNT'nin çapı küçüldükçe hibritleşme derecesi artar. Bu nedenle, KNT'nin reaktifliği, artan eğriliğin neden olduğu π -orbital uyumsuzluğu ile doğrudan ilişkilidir. Meydana gelen bu uyumsuzluğu minimize etmek için KNT'nin yan duvarı ile uç kapakları arasında bir ayırım yapılmalıdır. Aynı nedenden ötürü, daha küçük bir nanotüp çapı, reaktifliğin artmasına neden olur. KNT'nin yan duvarları veya uç kapakları kovalent kimyasal modifikasyonu gerçekleştirilmesinin mümkün olduğu belirlenmiştir. Örneğin, KNT'lerin farklı çözücülerde çözünürlüğü bu şekilde kontrol edilebilir. Fakat KNT'nin yan duvarlarında bulunan moleküler türlerin tamamen sp^2 bağlı karbon atomlarına kovalent olarak bağlanmasının zor olduğunu belirlenmiştir. Bu nedenle, nanotüpler genellikle kimyasal olarak inert kabul edilebilir (Varshney, 2014; Pitroda vd., 2016).

Lignoselülozik kompozitlerde karbon nanotüpler ile ilgili yapılan çalışmalar

Ağaç esaslı kompozitlerde KNT katkısının etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Fu vd. (2010), propilen/odun unu kompozitlerinde saf ve hidroksillendirilmiş KNT'lerin alev geciktirici ve termal kararlılık üzerindeki etkilerini araştırmış ve katkı ile bu özelliklerde artış sağlandığını belirtmiştir. Farsheh vd. (2011), PVC–odun unu–köpük sistemi içinde KNT kullanarak morfolojik, mekanik ve fiziksel özelliklerde iyileşme gözlemlemiş, özellikle çekme dayanımında artış ve su alma ile kalınlık şişmesinde azalma olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde Sahimi (2012), MDF’de farklı oranlarda KNT kullanıldığında eğilme direnci, iç bağlanma ve kalınlık şişmesinde artış elde etmiş; en yüksek değerler %5 katkıda görülmüştür. Dineshkumar (2014) ise %2.5 oranında ÇDKNT içeren MDF örneklerinin alev geciktirici, termal iletkenlik ve mekanik özelliklerinin iyileştiğini FTIR, XRD, DSC ve TGA analizleriyle kanıtlamıştır.

Farsi vd. (2014), ÇDKNT ve maleik anhidrit aşılannmış polietilen katkılı yüksek yoğunluklu polietilen/odun unu kompozitlerinde gerilme direnci ve elastisite modülünün arttığını, su emiliminin azaldığını bildirmiştir. Kumar vd. (2015), ÇDKNT’nin UF reçinesinde sertleşme davranışını etkilediğini, aktivasyon enerjisini düşürerek termal iletkenliği ve mekanik özellikleri artırdığını; ayrıca formaldehit emisyonunu azalttığını göstermiştir. Kaymakçı (2016), odun unu/propilen kompozitlerinde KNT katkısının su alma davranışını iyileştirdiğini raporlamıştır. Kumar vd. (2017) ise tepki yüzey metodolojisi (RSM) kullanarak presleme süresi, reçine oranı ve ÇDKNT miktarının optimizasyonunu yapmış ve MDF levhalarında iç bağ ile eğilme dayanımında maksimum değerlerin %3.5 katkıda elde edildiğini belirtmiştir.

Wang vd. (2018), lignoselülozik kitosan-ÇDKNT kompozitlerinde mekanik dayanım, boyutsal kararlılık ve yangına dayanımda artış raporlamış; özellikle duman salımı ve ısı açığa çıkışında önemli azalmalar belirlemiştir. Gupta vd. (2018), KNT, Al_2O_3 ve aktif kömür katkılarıyla MDF üretiminde termo-fiziksel özelliklerin ve kürleşmenin geliştiğini; KNT ve Al_2O_3 'ün mekanik özellikleri artırırken aktif kömürün formaldehit emisyonunu düşürdüğünü ifade etmiştir. Lukawski vd. (2019), yongaların KNT süspansiyonu ile işlenmesi sonucunda yanma süresinin uzadığını, ancak üretilen levhaların mekanik özelliklerinde belirgin bir iyileşme olmadığını bulmuştur. Kaymakçı vd. (2019) ise ahşap/propilen nanokompozitlerde KNT katkısıyla yüzey sertliğinin ve pürüzlülüğün arttığını, ıslanabilirliğin azaldığını göstermiştir.

Gul vd. (2020), ÇDKNT katkılı MDF üretiminde %5'e kadar KNT ilavesinin termal iletkenliği %24.2 artırdığını, sertleşme süresini %20 kısalttığını, formaldehit emisyonunu %59.4 azalttığını ve mekanik özelliklerde %20–30 arasında iyileşme sağladığını raporlamıştır. Son olarak Mazaheri vd. (2022), KNT dolgulu UF reçinelerinde formaldehit tutucu olarak KNT kullanımının serbest formaldehit emisyonunu %71'e kadar azalttığını, aynı zamanda reçinenin morfolojik ve termal özelliklerini geliştirdiğini ortaya koymuştur.

KNT'lerin selüloz esaslı kâğıtlarla birleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda ise, bu malzemelerin elektriksel iletkenlik, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama, termal kararlılık ve mekanik dayanım açısından önemli iyileştirmeler sağladığını ortaya koymaktadır. KNT ağının optimize edilmesiyle 0.05–671 S/m aralığında yüksek elektriksel iletkenlik ve mikrodalga bölgesinde yüksek dielektrik değerleri elde edilmiş; 4.8 wt.% KNT içeriğinde 5–10 GHz frekans aralığında 50 dB yakın-alan EMI kalkanlama başarılmıştır (Imai vd., 2010). Benzer şekilde, dip-kaplama yöntemiyle üretilen ÇDKNT/selüloz kâğıtlar, kaplama sayısına

bağlı olarak iletkenliklerini 0.02 S/cm'den 1.11 S/cm'ye kadar artırmış; böylece yüksek sıcaklık yanıtı, enerji verimliliği ve yaklaşık 1 GHz'de 20.3 dB EMI kalkanlama sağlamıştır (Lee vd., 2016).

Daha güncel çalışmalarda, Güney Kore'de istilacı tür olan büyük altınbaşak bitkisinden elde edilen selüloz lifleri KNT katkısıyla kâğıt üretiminde kullanılmış, karbonizasyon sıcaklığı, kalınlık ve KNT oranı artırılarak iletkenlik ve EMI SE değerleri geliştirilmiştir. Özellikle 1300 °C'de karbonize edilen ve 4.5 mm kalınlığa sahip TGCF/CNT-15 kâğıdı, 6.35 S/cm iletkenlik ve 1.6 GHz'de yaklaşık 62 dB EMI kalkanlama göstermiş, ayrıca esnekliği sayesinde bükülüp sarılabilmektedir (Park vd., 2022). Bunun yanında, jelatin çözeltisiyle hazırlanan ÇDKNT/sellüloz kâğıtların hem yüzeylerinde uniform iletkenlik sağlanmış hem de 10.5 GHz'de güçlü mikrodalga soğurma performansı elde edilmiştir. Bu kâğıtlar, elektronik, manyetik, yarı iletken ve biyoteknolojik alanlarda çok işlevli biyomalzemeler olarak öne çıkmaktadır (Maria ve Mieno, 2017).

Bunlara ek olarak, çift ve üç duvarlı KNT'lerin (FDKNT) nanoselüloz lifleri (CNF) ile birleştirilmesiyle geliştirilen buckypaper kompozitler, esneklik ve mekanik dayanımda dikkate değer artışlar sağlamış (çekme dayanımında %375, gerinimde %400) ve yüksek performanslı redoks süperkapasitör elektrotları için uygun bulunmuştur. Bu elektrotlar farklı pH'larda kararlı çalışmış, 12.000 çevrim boyunca yüksek kapasitans korunumu göstermiştir. Özellikle HQ/H₂SO₄ elektrolitinde 380.8 F g⁻¹'den 216.1 F g⁻¹'e kadar spesifik kapasitans değerleri ile 28.2 Wh kg⁻¹ enerji yoğunluğu ve 3974.7 W kg⁻¹ güç yoğunluğu elde edilmiştir (Santos vd., 2020).

Özellikle son yıllarda ise selüloz, nanoselüloz (NC) ve KNT karışımlarına yönelik araştırmalar hız kazanmıştır. Selüloz ve

NC'nin çevre dostu, biyobozunur özellikleri ile KNT'nin üstün mekanik, elektriksel ve termal özelliklerinin birleşmesi, farklı kombinasyonlarla kontrol edilebilen, sürdürülebilir ve çok işlevli malzemelerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Ancak bu konuda derleme çalışmalarının sınırlı olması, kapsamlı incelemelere olan ihtiyacı ortaya koymaktadır (Miyashiro vd., 2020).

Genel olarak, literatürdeki çalışmalar KNT'lerin lignoselülozik kompozitlerin hem mekanik ve fiziksel özellikleri hem de alev geciktirici ve termal performansını önemli ölçüde geliştirdiğini; ayrıca formaldehit emisyonunu azaltarak çevresel ve sağlık açısından da avantaj sağladığını göstermektedir.

Genel Değerlendirme ve Geleceğe Bakış

KNT'lerin kompozit malzemelerde katkı maddesi olarak kullanılması, basınç ve çekme dayanımı, elastikiyet modülü, eğilme direnci, gözeneklilik, elektriksel iletkenlik ve alev geciktiricilik gibi temel özelliklerde belirgin iyileşmeler sağlamaktadır. Bu üstün mekanik ve fonksiyonel özellikler sayesinde KNT'ler, son yıllarda yapı malzemelerinin performansını artırmaya yönelik önemli bir katkı bileşeni hâline gelmiştir. Özellikle ahşap esaslı kompozitlerde yapılan araştırmalar, KNT ilavesinin malzemelerin mekanik dayanımını güçlendirdiğini, gözeneklilik ve iletkenlik davranışlarını olumlu yönde değiştirdiğini ve aynı zamanda yangın güvenliği açısından avantaj sağladığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla KNT'ler, geleneksel malzemelerin sınırlarını aşarak daha dayanıklı, fonksiyonel ve sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesinde umut vadeden nanomalzemelerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Karbon nanotüplerin kullanımlarının yaygınlaşmasının önündeki engeller:

- KNT'ler, bütün organik çözücüler ve sulu çözeltelerde çözünmezler. Bu yüzden, ultrasonik ses cihazlarının kullanılmasının yanı sıra, yüzey aktif maddeler veya kimyasal ajanlar kullanılarak da dağılmaları gerekir.

- KNT'lerin sahip oldukları potansiyelleri nedeniyle, yakın gelecekte yeni teknolojilerin geliştirilmesinde önemli rol oynayacakları açıktır, ancak şuanda bu teknolojilerin önündeki en büyük engel KNT'lerin miktarı ve maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

Kaynakça

Ahire, S. A., Bachhav, A. A., Pawar, T. B., Jagdale, B. S., Patil, A. V., & Koli, P. B. (2022) The Augmentation of nanotechnology era: A concise review on fundamental concepts of nanotechnology and applications in material science and technology. *Results in Chemistry*, 4, 100633.

Anzar, N., Hasan, R., Tyagi, M., Yadav, N., & Narang, J. (2020) Carbon nanotube-A review on Synthesis, Properties and plethora of applications in the field of biomedical science. *Sensors International*, 1, 100003.

Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2019) The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical–physical applications to nanomedicine. *Molecules*, 25(1), 112.

Bowman, D. M., & Hodge, G. A. (2006) Nanotechnology: Mapping the wild regulatory frontier. *Futures*, 38(9), 1060-1073.

Cacciatore, M. A., Scheufele, D. A., & Corley, E. A. (2011) From enabling technology to applications: The evolution of risk perceptions about nanotechnology. *Public Understanding of Science*, 20(3), 385-404.

Camilli, L., & Passacantando, M. (2018) Advances on sensors based on carbon nanotubes. *Chemosensors*, 6(4), 62.

Dineshkumar, S. (2014) Use of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) in medium density fiberboard to increase the fire retardancy (Doctoral dissertation, PhD Thesis. Universiti Malaysia Pahang).

Dubey, R., Dutta, D., Sarkar, A., & Chattopadhyay, P. (2021) Functionalized carbon nanotubes: synthesis, properties and

applications in water purification, drug delivery, and material and biomedical sciences. *Nanoscale Advances*, 3(20), 5722-5744.

Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N., Akbarzadeh, A., ... & Joo, S. W. (2014) Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications. *Nanoscale research letters*, 9(1), 393.

Eklund, P., Ajayan, P., Blackmon, R., Hart, A. J., Kibng, J., Pradhan, B., ... & Rinzler, A. (2007) International assessment of research and development of carbon nanotube manufacturing and applications.

Farsheh, A. T., Talaeipour, M., Hemmasi, A. H., Khademieslam, H., & Ghasemi, I. (2011) Investigation on the mechanical and morphological properties of foamed nanocomposites based on wood flour/PVC/multi-walled carbon nanotube.

Farsi, M., & Sani, F. M. (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.

Fenta, E. W., & Mebratie, B. A. (2024) Advancements in carbon nanotube-polymer composites: Enhancing properties and applications through advanced manufacturing techniques. *Heliyon*, 10(16).

Fu, S., Song, P., Yang, H., Jin, Y., Lu, F., Ye, J., & Wu, Q. (2010) Effects of carbon nanotubes and its functionalization on the thermal and flammability properties of polypropylene/wood flour composites. *Journal of Materials Science*, 45(13), 3520-3528.

Gul, W., Alrobei, H., Shah, S. R. A., Khan, A., Hussain, A., Asiri, A. M., & Kim, J. (2020) Effect of embedment of MWCNTs

for enhancement of physical and mechanical performance of medium density fiberboard. *Nanomaterials*, 11(1), 29.

Gupta, A., Kumar, A., Sharma, K. V., & Gupta, R. (2018) Application of high conductive nanoparticles to enhance the thermal and mechanical properties of wood composite. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 3143-3149.

Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P., Rab, S., & Suman, R. (2023) Applications of nanotechnology in medical field: a brief review. *Global Health Journal*, 7(2), 70-77.

He, H., Pham-Huy, L. A., Dramou, P., Xiao, D., Zuo, P., & Pham-Huy, C. (2013) Carbon nanotubes: applications in pharmacy and medicine. *BioMed research international*, 2013(1), 578290.

Ibrahim, K. S. (2013) Carbon nanotubes? properties and applications: A review. *Carbon letters*, 14(3), 131-144.

Imai, M., Akiyama, K., Tanaka, T., & Sano, E. (2010) Highly strong and conductive carbon nanotube/cellulose composite paper. *Composites Science and Technology*, 70(10), 1564-1570.

Jasmani, L., Rusli, R., Khadiran, T., Jalil, R., & Adnan, S. (2020) Application of nanotechnology in wood-based products industry: A review. *Nanoscale research letters*, 15(1), 207.

Kaymakcı, A. (2016) Karbon nanotüp ile güçlendirilen ahşap polimer nanokompozitlerin uzun süreli su alma davranışı. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 16(1).

Kaymakci, A., Birinci, E., & Ayrilmis, N. (2019) Surface characteristics of wood polypropylene nanocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*, 157, 43-46.

Kazlev, M. (2003) History of Nanotechnology, <http://www.kheper.net/topics/nanotech/nanotech-history.htm>, accessed at May 2011.

Khare, R., & Bose, S. (2005) Carbon nanotube based composites-a review. *Journal of minerals and Materials Characterization and Engineering*, 4(1), 31-46.

Kumar, A., Gupta, A., & Sharma, K. V. (2015) Thermal and mechanical properties of urea-formaldehyde (UF) resin combined with multiwalled carbon nanotubes (MWCNT) as nanofiller and fiberboards prepared by UF-MWCNT. *Holzforschung*, 69(2), 199-205.

Kumar, A., Sharma, K. V., Gupta, A., Tywoniak, J., & Hajek, P. (2017) Optimization of processing parameters of medium density fiberboard using response surface methodology for multiwalled carbon nanotubes as a nanofiller. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(2), 203-213.

Lee, T. W., Lee, S. E., & Jeong, Y. G. (2016) Carbon nanotube/cellulose papers with high performance in electric heating and electromagnetic interference shielding. *Composites Science and Technology*, 131, 77-87.

Lukawski, D., Grzeskowiak, W., Dukarska, D., Mazela, B., Lekawa-Raus, A., & Dudkowiak, A. (2019) The influence of surface modification of wood particles with carbon nanotubes on properties particleboard glued with phenol-formaldehyde resin. *Drewno. Prace Naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 62(203).

Maeda, T., & Horie, C. (1999) Phonon modes in single-wall nanotubes with a small diameter. *Physica B: Condensed Matter*, 263, 479-481.

Maheswaran, R., & Shanmugavel, B. P. (2022) A critical review of the role of carbon nanotubes in the progress of next-generation electronic applications. *Journal of Electronic Materials*, 51(6), 2786-2800.

Maria, K. H., & Mieno, T. (2017) Production and properties of carbon nanotube/cellulose composite paper. *Journal of Nanomaterials*, 2017(1), 6745029.

Maultzsch, J., Reich, S., Thomsen, C., Dobardžić, E., Milošević, I., & Damnjanović, M. (2002) Phonon dispersion of carbon nanotubes. *Solid state communications*, 121(9-10), 471-474.

Mazaheri, M., Moghimi, H., & Taheri, R. A. (2022) Urea impregnated multiwalled carbon nanotubes; a formaldehyde scavenger for urea formaldehyde adhesives and medium density fiberboards bonded with them. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(1), 51445.

Mehra, N. K., Jain, A. K., Lodhi, N., Raj, R., Dubey, V., Mishra, D., ... & Jain, N. K. (2008) Challenges in the use of carbon nanotubes for biomedical applications. *Critical Reviews™ in Therapeutic Drug Carrier Systems*, 25(2).

Miyashiro, D., Hamano, R., & Umemura, K. (2020) A review of applications using mixed materials of cellulose, nanocellulose and carbon nanotubes. *Nanomaterials*, 10(2), 186.

Murjani, B. O., Kadu, P. S., Bansod, M., Vaidya, S. S., & Yadav, M. D. (2022) Carbon nanotubes in biomedical applications: current status, promises, and challenges. *Carbon Letters*, 32(5), 1207-1226.

Nikalje, A. P. (2015) Nanotechnology and its applications in medicine. *Med chem*, 5(2), 081-089.

Pandey, P., & Dahiya, M. (2016) Carbon nanotubes: Types, methods of preparation and applications. *Carbon*, 1(4), 15-21.

Park, J., Kwac, L. K., Kim, H. G., & Shin, H. K. (2022) Carbon papers from tall goldenrod cellulose fibers and carbon nanotubes for application as electromagnetic interference shielding materials. *Molecules*, 27(6), 1842.

Pitroda, J., Jethwa, B., & Dave, S. K. (2016) A critical review on carbon nanotubes. *Int. J. Constr. Res. Civ. Eng.* 2(5), 36-42.

Poole Jr, C. P., & Owens, F. J. (2003) Introduction to nanotechnology. John Wiley & Sons.

Popov, V. N. (2004) Carbon nanotubes: properties and application. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 43(3), 61-102.

Pramanik, P., Krishnan, P., Maity, A., Mridha, N., Mukherjee, A., & Rai, V. (2020) Application of nanotechnology in agriculture. In *Environmental Nanotechnology Volume 4* (pp. 317-348). Cham: Springer International Publishing.

Rashko, M. N., Hamad, S. M., Barzinjy, A. A., & Hamad, A. H. (2022) Mechanical properties of carbon nanotubes (CNTs): A review. *Eurasian Journal of Science and Engineering*, 8(2), 54-68.

Rathinavel, S., Priyadarshini, K., & Panda, D. (2021) A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application. *Materials Science and Engineering: B*, 268, 115095.

Ruoff, R. S., & Lorents, D. C. (1995) Mechanical and thermal properties of carbon nanotubes. *carbon*, 33(7), 925-930.

Sahimi, M. H. (2012) Use of Carbon Nanotubes to Enhance the Physical and Mechanical Properties of Wood Composites(Doctoral dissertation, UMP).

Santos, M. C., da Silva, D. R., Pinto, P. S., Ferlauto, A. S., Lacerda, R. G., Jesus, W. P., ... & Lavall, R. L. (2020) Buckypapers of carbon nanotubes and cellulose nanofibrils: Foldable and flexible electrodes for redox supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 349, 136241.

Sarangdevot, K., & Sonigara, B. S. (2015) The wondrous world of carbon nanotubes: Structure, synthesis, properties and applications. *J. Chem. Pharm. Res*, 7(6), 916-933.

Shoukat, R., & Khan, M. I. (2021) Carbon nanotubes: a review on properties, synthesis methods and applications in micro and nanotechnology. *Microsystem Technologies*, 27(12), 4183-4192.

Stevens, S. Y., & Sutherland, L. M. (2009) The big ideas of nanoscale science and engineering. NSTA press.

Suzuki, S. (Ed.). (2013) Physical and chemical properties of carbon nanotubes. BoD–Books on Demand.

Syduzzaman, M., Saad, M. S. I., Piam, M. F., Talukdar, T. A., Shobdo, T. T., & Pritha, N. M. (2025) Carbon nanotubes: Structure, properties and applications in the aerospace industry. *Results in Materials*, 25, 100654.

Szabó, A., Perri, C., Csató, A., Giordano, G., Vuono, D., & Nagy, J. B. (2010) Synthesis methods of carbon nanotubes and related materials. *Materials*, 3(5), 3092-3140.

Taczak, M. D. (2007) Controlling the structure and properties of carbon nanotubes, Report No. MP070015, The MITRE Corporation, McLean, VA

Thostenson, E. T., Ren, Z., & Chou, T. W. (2001) Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites science and technology*, 61(13), 1899-1912.

Varshney, K. (2014) Carbon nanotubes: a review on synthesis, properties and applications. *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci*, 2(4), 660-77.

Venkataraman, A., Amadi, E. V., Chen, Y., & Papadopoulos, C. (2019) Carbon nanotube assembly and integration for applications. *Nanoscale research letters*, 14(1), 220.

Wang, Z., Yan, Y., Shen, X., Qian, T., Wang, J., Sun, Q., & Jin, C. (2018) Lignocellulose-chitosan-multiwalled carbon nanotube composites with improved mechanical strength, dimensional stability and fire retardancy. *Polymers*, 10(3), 341.

Yu, C., Shi, L., Yao, Z., Li, D., & Majumdar, A. (2005) Thermal conductance and thermopower of an individual single-wall carbon nanotube. *Nano letters*, 5(9), 1842-1846.

BÖLÜM 7

EĞİTİM – ÖĞRETİMDE GELECEĞE YÖNELİK BEKLENTİLERİN ARAŞTIRILMASI (DÜZCE ÜNİVERSİTESİ ORMANCILIK MESLEK YÜKSEKOKULU)

MUHAMMET ÇİL¹

Giriş

2547 sayılı Kanuna göre Meslek yüksekokulu (MYO); belirli bir mesleğe yönelik eğitim öğretime ağırlık vermeyi amaçlayan, iki yıllık eğitim veren ve ön lisans diploması sağlayan bir yükseköğretim kurumudur (Yükseköğretim Kanunu, 2016).

Ülkemizde yükseköğretim içinde önemli bir paya sahip olan meslek yüksekokullarının sayısı, bölgesel özellikler ve iş dünyasının ihtiyaçları doğrultusunda hızla artmaktadır. Meslek yüksekokullarında sosyal bilimler ve fen bilimleri alanlarında açılan programlar, iş hayatına ara eleman yetiştirme misyonunu taşımaktadır. Küreselleşmeyle birlikte iş dünyası, ihtiyaç duyduğu nitelikli iş gücünü üniversitelerden ve meslek yüksekokullarından beklemektedir. Bu nedenle mesleki eğitimin sektörlerle yakın iş birliği içinde olması, programların güncel tutulması ve öğretim

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-7964-8525

elemanlarının piyasa deneyimine sahip olması büyük önem taşımaktadır (İşseveroğlu ve Gençoğlu, 2011).

2015 yılında kamuda gerçekleştirilen merkezi atamalarda toplam 20.300 kişi istihdam edilmiş; bu sayı içerisinde 5.689'u (%28) ve engelli kontenjanından ilave 1.144 kişi olmak üzere önemli bir bölümü ön lisans mezunlarından oluşmuştur. Bu durum, meslek yüksekokullarının yalnızca özel sektörün ara eleman ihtiyacını değil, aynı zamanda kamu sektörünün nitelikli personel gereksinimini de karşılamada kritik bir role sahip olduğunu göstermektedir. Artan istihdam olanakları, meslek yüksekokullarının önemini güçlendirecek ve öğrenci temininde yaşanan sorunları azaltacaktır (Tekbalkan ve Sevim, 2016).

2013, 2018 ve 2023 yıllarına ait öğrenim düzeyine göre yükseköğretim mezun sayıları incelendiğinde, ön lisans mezunu bireylerin sayısında belirgin bir artış eğilimi olduğu görülmektedir. Nitekim ön lisans düzeyinde mezun sayısı 2013 yılında 251.854 iken, 2018 yılında 316.465'e yükselmiş; 2023 yılına gelindiğinde ise 385.192 kişiyle en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Bu artış, hem yükseköğretime erişimin genişlediğini hem de mesleki ve teknik alanlara yönelik talebin arttığını göstermektedir (Yurdakul ve Şahin-Demir, 2024).

Öte yandan, 2023 yılı İŞKUR veri tabanında yer alan istatistiklere göre, aynı yıl 62.086 erkek ve 65.746 kadın olmak üzere toplam 127.832 ön lisans mezununun istihdam edildiği belirlenmiştir. Söz konusu veriler birlikte değerlendirildiğinde, ön lisans mezunu sayısındaki artışa rağmen istihdama dâhil olabilen kişi sayısının sınırlı kaldığı; dolayısıyla mezuniyet-istihdam arasındaki dengenin tam olarak sağlanamadığı anlaşılmaktadır (İŞKUR, 2023). Ön lisans mezunu işsizlerin sayısındaki bu artışa; aldıkları eğitime uygun iş bulamamaları, bilgi eksikliği, ücret beklentilerinin ve çalışma saatlerinin fazla olması gibi sebepler neden olmaktadır (Ağırgan ve Yılmaz, 2016).

Meslek yüksekokullarının temel işlevi, iş gücü piyasasının ihtiyaç duyduğu nitelikli ara elemanları yetiştirerek ekonomik ve toplumsal yapının sürdürülebilir gelişimine katkı sağlamaktır. Bu kurumların, hızla değişen üretim teknolojileri, dijitalleşme ve iş piyasasının dinamik yapısı karşısında çağdaş bir eğitim anlayışıyla yeniden yapılandırılması gerekmektedir. Bu nedenle, meslek yüksekokullarının program içeriklerinin güncellenmesi, uygulamalı eğitimin güçlendirilmesi, sektör iş birliklerinin artırılması ve müfredatın iş dünyasının beklentileriyle uyumlu hâle getirilmesi, niteliğin artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, meslek yüksekokullarında öğrenim gören öğrencilerin çalışma yaşamına yönelik beklentilerinin belirlenmesi, yapılacak düzenlemelerin etkililiğini artıracak kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Fırat ve Özel, 2003).

Son yıllarda yapılan bilimsel araştırmalar, Meslek yüksekokullarının hem yapısal hem de eğitim süreçleri açısından çeşitli sorunlarla karşı karşıya olduğunu ortaya koymaktadır. MYO'larda sektör ile yeterli iş birliğinin kurulmadığı, okul ve program açılışlarının iş gücü talebine göre planlanmadığı, bazı programların iş piyasasında karşılığının bulunmadığı ve sosyal-kültürel imkânların yetersiz olduğu bildirilmektedir (Günay ve ark., 2020). Öğrencilerin algısı da bu bağlamda önem taşımakta olup, yapılan çalışmalarda öğrencilerin teknik donanım ve uygulamalı eğitim eksikliklerinden şikâyetçi oldukları ve eğitime yönelik memnuniyet düzeylerinin düşük olduğu görülmektedir (Kaya, 2014). Ayrıca, öğrencilerin mesleki eğitime yönelik tutumları ile gelecek beklentileri arasında anlamlı bir ilişki bulunmakta, geleceğe dair olumlu beklentiler mesleki eğitim tutumunu güçlendirmekte ve motivasyon ile eğitim sürecine bağlılığı artırmaktadır (Tuncer ve Tanaş, 2020). Can (2020), MYO öğrencilerinin yükseköğretimde kaliteye ilişkin algılarını incelemiştir. Bu kapsamda elde edilen bulgularda, öğrencilerin özellikle uygulamalı eğitimin yetersizliği,

teknik altyapı eksiklikleri, sosyal-kültürel imkânların sınırlılığı ve ders içeriklerinin sektörün beklentileriyle uyumlu olmaması gibi sorunları dile getirdikleri belirtilmiştir. Erdem ve ark., (2019), MYO öğrencilerinin öğrenme ortamı ve öğretim elemanlarına ilişkin değerlendirmelerini incelemiştir. Bulgular, öğrencilerin sınıf ve laboratuvar donanımı, fiziki mekân yeterliliği ile sosyal ve sportif imkânlar bakımından önemli eksiklikler algıladığını göstermektedir. Öğretim elemanlarına yönelik görüşlerde ise ders işleme yöntemlerinin yetersizliği, uygulamalı derslerde etkinlik eksikliği ve öğrenci-öğretim elemanı iletişiminin güçlendirilmesi gerekliliği öne çıkmaktadır. Elde edilen bu literatür bulguları, MYO'ların yalnızca altyapı ve müfredat açısından değil, öğrencilerin motivasyon, algı ve gelecek beklentilerini de dikkate alarak yeniden yapılandırılmasının önemini vurgulamaktadır.

Meslek yüksekokullarının karşı karşıya bulunduğu yapısal ve işlevsel sorunların, öğrencilerin eğitim-öğretim süreçlerine ve kuruma yönelik algılarına nasıl yansıdığının ortaya konulması, mesleki eğitimin geliştirilmesi açısından kritik bir önem taşımaktadır. Öğrencilerin öğrenme ortamlarına, sunulan eğitim-öğretimin niteliğine ve geleceğe ilişkin beklentilerine dair görüşleri, meslek yüksekokullarındaki mevcut durumun anlaşılmasına ve iyileştirme alanlarının belirlenmesine önemli katkılar sunmaktadır. Bu bağlamda gerçekleştirilen çalışma, meslek yüksekokulu öğrencilerinin okullarına yönelik değerlendirmelerini, verilen eğitim-öğretime ilişkin algılarını ve mesleki geleceklerine dair düşüncelerini sistematik biçimde incelemeyi amaçlamaktadır. Böylece, mesleki eğitimin kalitesinin artırılmasına yönelik politika ve uygulamalara bilimsel bir zemin oluşturulması hedeflenmektedir.

Materyal ve Yöntem

Eğitim süreci, bireyin isteyerek ya da çeşitli dış etkenlerin yönlendirmesiyle seçmek durumunda kaldığı mesleğe ilişkin bilgi,

beceri ve yeterlilikleri edinme aşamasını kapsamaktadır. Seçilen alanda başarıya ulaşılması, büyük ölçüde alınan eğitimin niteliğine ve meslek tercihinin bireyin kendi istek ve eğilimleri doğrultusunda yapılmasına bağlıdır.

Yükseköğretim sürecinin son aşamasına gelen öğrencilerin, mesleki geleceklerine ilişkin planlama yapmış ve kararlarını netleştirmiş olmaları beklenmektedir. Bu karar verme süreci; bireyin geleceğe dair öngörülerini, içinde yetiştiği sosyal ve kültürel çevrenin özellikleri, kişisel beklentileri ve çok sayıda farklı değişkene bağlı olarak şekillenmektedir. Dolayısıyla, kariyer tercihinin oluşturulması, hem bireysel hem de çevresel unsurların etkileşimiyle ortaya çıkan dinamik ve çok boyutlu bir süreç niteliği taşımaktadır.

Çalışma kapsamında, ön lisans düzeyinde öğrenim gören öğrencilerin eğitim-öğretim müfredatının iyileştirilmesine yönelik yapılması gereken düzenlemelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık ve Orman Ürünleri Programı'nda öğrenim gören öğrencilere ulaşılması hedeflenmiştir. Düzce Üniversitesi Öğrenci İşleri Daire Başkanlığı kayıtlarına göre, söz konusu programda ön lisans düzeyinde kayıtlı toplam öğrenci sayısı 143'tür. Toplam 143 öğrenci anketinden 75 adedinin değerlendirilebilecek durumda olduğu ön inceleme sonucunda belirlenmiştir. Elde edilen anketlerin geri dönüş oranı %52.4 olarak bulunmuştur. Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında, ana kütle üzerinden gerçekleşen geri dönüş oranlarının genellikle %20 ile %45 arasında değiştiği gözükmemektedir (Bal ve Gundry, 1999; Hum ve Leow, 1996).

Anket sonuçlarının analize uygun hale getirilebilmesi amacıyla, öncelikle anket formlarında yer alan değişkenler sistematik biçimde kodlanmış ve analiz sürecinin her aşaması için ayrı veri tabanları oluşturulmuştur. Bu yapılandırılmış veri tabanları kullanılarak, anket formundaki sorulara ilişkin bölüm bazlı ortalamalar hesaplanmış; elde edilen veriler çapraz tablo analizleri

ve Ki-kare testi aracılığıyla istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntemsel yaklaşım, değişkenler arasındaki ilişkilerin ortaya konulmasına, farklı öğrenci gruplarının görüş farklılıklarının istatistiksel açıdan anlamlı olup olmadığının belirlenmesine ve çalışmanın genel bulgularının bilimsel geçerlilik temelinde yorumlanmasına olanak sağlamıştır.

Bulgular ve Tartışma

Öğrencilerin bazı demografik özellikleri

Katılımcı öğrencilere ait demografik bilgiler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1 Öğrencilere ait demografik özellikler

Demografik Bilgi		Sıklık	Yüzde	Demografik Bilgi		Sıklık	Yüzde
Sınıf	1	30	40.0	Meslek (Baba)	Memur	12	16.0
	2	45	60.0		İşçi	30	40.0
	Toplam	75	100		Çiftçi	7	9.3
Cinsiyet	Kız	23	30.7		Emekli	26	34.7
	Erkek	52	69.3		Toplam	75	100
	Toplam	75	100	Meslek (Anne)	Memur	2	2.7
Yaş (yıl)	18-20	56	74.7		İşçi	23	30.6
	21-23	17	22.7		Ev hanımı	47	62.7
	24-26	2	2.6		Emekli	3	4.0
	Toplam	75	100		Toplam	75	100
Kardeş sayısı	2	32	42.7	Burs alma	Evet	10	13.3
	3	22	29.3		Hayır	65	86.7
	4	13	17.3		Toplam	75	100
	5	8	10.7	Barınma	Yurt	46	61.3
	Toplam	75	100		Ev	12	16.0
Aile aylık gelir durumu (TL)	<22100	17	22.7		Aile	17	22.7
	22100 - 44200	24	32.0	Mezun olduğu lise	Toplam	75	100
	44201 - 66300	30	40.0		Genel lise	26	34.6
	66300>	4	5.3		Anadolu teknik lisesi	49	65.4
	Toplam	75	100		Toplam	75	100

Tablo 1’de görüldüğü üzere, çalışma kapsamında ulaşılan 75 öğrencinin çoğunluğu ikinci sınıf öğrencilerinden (%60) oluşurken, birinci sınıf öğrencileri %40 oranındadır. Katılımcıların %69.3’ü erkek, %30.7’si kızdır. Erkek öğrencilerin oranının belirgin şekilde daha yüksek olduğu görülmektedir. Öğrencilerin büyük çoğunluğu 18-20 yaş aralığındadır (%74.7). Bu bulgu, örneklemin tipik

üniversite başlangıç yaş grubunda yoğunlaştığını göstermektedir. Daha ileri yaş gruplarının oranı oldukça düşüktür. Katılımcı öğrencilerin çoğu iki veya üç kardeşe sahiptir (%72). Bu durum, öğrencilerin genellikle orta büyüklükte ailelerden geldiklerini göstermektedir. Aile gelirleri ağırlıklı olarak orta gelir grubunda toplanmaktadır. Katılımcı öğrencilerin %40'ının geliri 44.201-66.300 TL aralığında, %32'sinin ise 22.100-44.200 TL aralığındadır. Yüksek gelir grubunda yer alanların oranı ise oldukça düşüktür (%5.3).

Katılımcı öğrencilerin anne ve babalarının meslek durumları incelendiğinde, babaların meslek grubu dağılımında işçi (%40) ve emekli (%34.7) gruplarının öne çıktığı görülmektedir. Buna karşılık, memur ve çiftçi oranlarının görece düşük düzeyde kalması, araştırmaya dâhil olan ailelerin büyük bir bölümünün sosyoekonomik açıdan ağırlıklı olarak ücretli emek temelli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Annelerin meslek durumları incelendiğinde, büyük çoğunluğunun ev hanımı olduğu (%62.7) görülmektedir. Çalışan anneler arasında ise en yüksek oran işçi grubunda yer almaktadır (%30.6). Buna karşılık, memur ve emekli annelerin oranlarının oldukça düşük düzeyde kaldığı saptanmıştır.

Katılımcı öğrencilerin %86.7'si burs almamaktadır, yalnızca %13.3'ü burs almaktadır. Ayrıca öğrencilerin büyük çoğunluğu kredi ve yurtlar kurumu yurtlarında (%61.3) kalmaktadır. Ailesiyle kalanların oranı %22.7, evde kalanların oranı ise %16'dır. Öğrencilerin %65.4'ü Anadolu teknik lisesi, %34.6'sı ise genel lise mezunudur. Bu bulgu, örneklemin ağırlıklı olarak teknik ve mesleki altyapıya sahip öğrencilerden oluştuğunu göstermektedir.

Öğrencilerin sigara ve alkol kullanım durumları birlikte değerlendirildiğinde, her iki alışkanlığın da katılımcı grubunda düşük düzeylerde olduğu görülmektedir. Sigara kullananların oranı %20 iken, alkol kullananların oranı %6.7 ile daha da düşük bir

düzeydedir. Buna karşılık, katılımcıların büyük çoğunluğunun ne sigara (%80) ne de alkol (%93.3) kullanmadığı saptanmıştır.

Öğrencilerin boş zamanlarını değerlendirme biçimleri incelendiğinde, kütüphane kullanımının görece düzenli olduğu, ancak internet kullanımının daha baskın bir etkinlik haline geldiği görülmektedir. Katılımcıların %80'i kütüphaneyi haftada bir ya da 15 günde bir kullanırken, interneti günde 1-5 saat kullananların oranı %72'dir. İnternette en sık ziyaret edilen siteler ağırlıklı olarak eğlence amaçlıdır (%49.3). Buna karşılık, sanatsal faaliyetlere katılımın oldukça sınırlı olduğu (%22.7) saptanmıştır. Bu bulgular, katılımcıların boş zamanlarını daha çok internet ve eğlence odaklı etkinliklerle geçirdiklerini göstermektedir.

Katılımcı öğrencilerin sınav süreci ve tercih davranışları değerlendirildiğinde, bireysel çabanın ve bilinçli tercihin ön planda olduğu görülmektedir. Katılımcıların %73.3'ü sınava kendi gayretleriyle hazırlanmış, çoğunluğu sınava ilk (%58.7) veya ikinci (%33.3) kez girmiştir. Ayrıca katılımcıların %58.7'si yerleştikleri bölümü birinci tercih olarak belirtmiş ve büyük bir kısmı tercihlerini bilinçli yaptığını (%70.7) ifade etmiştir. Bu bulgular, sınav sürecinde bireysel hazırlık ve bilinçli karar verme eğiliminin yaygın olduğunu göstermektedir.

Öğrencilere Ormancılık ve orman ürünleri programının özellikleri ve içeriği hakkında önceden bilgi sahibi olup olmadıkları sorulduğunda, %33.3'ünün program hakkında kesin bilgiye sahip olduğu, %66.7'sinin ise bilgilerini sınırlı düzeyde (az-çok) değerlendirdiği görülmektedir. Bu bulgu, öğrencilerin program hakkında genel bir farkındalığa sahip olduklarını, ancak derinlemesine veya kesin bilgiye sahip olanların sınırlı sayıda olduğunu göstermektedir.

Öğrencilerin bölümde eğitim-öğretim ve akademik olanaklara ilişkin değerlendirmeleri

Katılımcı öğrencilere göre, öğretim elemanı sayısının yeterli olduğunu düşünenlerin oranı %92 ile oldukça yüksek bulunurken, malzeme, araç-gereç ve makine yeterliliği için %64, laboratuvar olanakları için %54.7 oranında “yeterli” görüşü belirtilmiştir.

Sosyal etkinlikler açısından, katılımcıların yalnızca %38.7’si yeterli bulurken, %48’i kısmen yeterli ve %13.3’ü yetersiz olarak değerlendirmiştir. Eğitimin genel yeterliliği konusunda ise %73.3’lük bir çoğunluk “yeterli” görüşünü belirtmiş, %26.7’si ise “kısmen yeterli” demiştir. Bu durum, akademik eğitimden memnuniyetin yüksek olduğunu göstermektedir.

Ders dışı yardım ve güncel konuların aktarımı ile ilgili değerlendirmelere bakıldığında, öğrencilerin %53.3’ü ders dışı yardımı “ara sıra” veya “sık sık” aldığını belirtmiş, %69.3’ü ise öğretim elemanlarının güncel konuları derslerde ele aldığına inandıklarını ifade etmiştir.

Öğrencilere göre eğitim-öğretimin iyileştirilmesi için yapılması gerekenler

Katılımcı öğrencilere göre ormancılık ve orman ürünleri programında verilen eğitimin yetersiz olmasında etkili olduğu düşünülen faktörler Tablo 2’de görüldüğü gibi üç önem düzeyine göre sıralanmıştır.

Tablo 2 Ön lisans düzeyinde verilen eğitimin yetersiz olmasında etkili olan faktörlerin önem düzeyleri

Faktörler	Önem düzeyleri		
	Çok önemli	Önemli	Az önemli
Bilmemiz gerekmeyen birçok bilginin yer alması	+	-	-
Teorik bilgilerin çok, uygulamanın az olması	+	-	-
Dersler seçmeli hale getirilsin	+	-	-
Haftalık saate göre kapsamının geniş olması	-	+	-
Laboratuvar çalışmasının yetersiz olması	-	+	-
Dil eğitimi geliştirilsin	-	+	-
Bilgisayar eğitimi geliştirilsin	-	+	-
Teori - pratik uyumunu sağlayamaması	-	+	-
Öğretici ve dersin sunumu yetersiz	-	+	-
Kendiniz (Öğrencinin derse ilgi düzeyinin olmaması)	-	+	-
Ders müfredatları özel sektör için yeterli değil	-	+	-
Kitap-ders notu ve dersle ilgili araçlar yetersiz	-	+	-
Ders içi ve ders dışı iletişiminin iyi olmaması	-	-	+
Ders müfredatları güncel değil	-	-	+

Katılımcı öğrencilere göre, ön lisans düzeyinde verilen eğitimin yetersiz olmasında çok önemli olarak değerlendirilen faktörler, derslerde gereksiz bilgilerin yer alması ve teorik bilginin yoğunluğunun uygulamaya göre fazla olmasıdır. Önemli düzeydeki faktörler ise haftalık ders saatlerinin kapsamının genişliği ve laboratuvar çalışmalarının yetersizliği olarak belirtilmiştir. Az önemli olarak değerlendirilen eksiklikler arasında ise ders içi ve ders dışı iletişimin yeterince iyi olmaması ile müfredatın güncel olmaması yer almaktadır.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, ormancılık ve orman ürünleri programına devam eden öğrencilerin demografik özellikleri, eğitim deneyimleri, boş zaman kullanımları ve program hakkındaki bilgi düzeyleri incelenmiştir. Katılımcılar ağırlıklı olarak ikinci sınıf, 18–20 yaş

aralığında ve erkek öğrencilerden oluşmakta, ailelerinin çoğu ücretli emek temelli olup anneler ev hanımıdır. Sağlıklı yaşam alışkanlıkları açısından sigara ve alkol kullanımı düşük, boş zamanlarda ise internet ve eğlence etkinlikleri baskındır; kütüphane kullanımı düzenli, sanatsal faaliyetlere katılım sınırlıdır.

Sınav ve tercih süreçlerinde öğrenciler bireysel hazırlık ve bilinçli karar verme eğilimi göstermekte, program hakkında önceden bilgi sahibi olma oranı ise sınırlıdır. Eğitim-öğretim olanakları açısından öğretim elemanı sayısı yeterli bulunurken, malzeme, laboratuvar ve sosyal etkinlikler ile ilgili yeterlilik algısı daha düşüktür.

Eğitimin yetersizliğine en çok gereksiz bilgi yükü ve teorik yoğunluk sebep olarak görülmüş, laboratuvar eksiklikleri ve ders saatlerinin kapsamı önemli sorunlar arasında değerlendirilmiş, ders içi-dışı iletişim ve müfredat güncelliği ise daha az öncelikli eksiklikler olarak belirtilmiştir.

Bu bulgular doğrultusunda, ders içeriklerinin gözden geçirilerek gereksiz teorik bilgilerin azaltılması, uygulamalı eğitimin artırılması, laboratuvar ve ders materyallerinin güçlendirilmesi, haftalık ders saatlerinin ve seçmeli ders imkânlarının öğrencilerin ilgi ve ihtiyaçlarına göre düzenlenmesi, dil ve bilgisayar eğitimlerinin geliştirilmesi, sosyal etkinlikler ve iletişim kanallarının güçlendirilmesi ile müfredatın güncel tutulması önerilmektedir. Bu önlemler, öğrencilerin akademik ve mesleki gelişimini destekleyerek programın eğitim kalitesini artıracaktır.

Kaynakça

- Ağırhan, M., & Yılmaz, R. (2016). Meslek yüksekokullarından mezun olan gençlerin istihdam durumu: Lüleburgaz MYO Tekstil Teknolojisi Programı örneği. *In 5th International Vocational Schools Symposium*, (s. 61-68).
- Bal, J., & Gundry, J. (1999). Virtual teaming in the automotive supply chain. *Team Performance Management: An International Journal*, 5(6), 174-193.
- Can, E. (2020). Yükseköğretimde kalite için meslek yüksekokulu öğrencilerinin görüşleri. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(3), 699-710.
- Erdem, A., Hüyük, D., Mete, H., & Uzal, G. (2019). Meslek yüksekokulu öğrencilerinin öğrenme ortamı ve öğretim elemanları ile ilgili görüşleri. *Kırklareli Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(3), 350-360.
- Fırat, Z. Y., & Özel, N. (2003). Uludağ Üniversitesi Meslek Yüksekokullarında okuyan öğrencilerin çalışma hayatından beklentileri üzerine bir değerlendirme. *ISGUC The Journal of Industrial Relations and Human Resources*, 5(1).
- Günay, A., Açıkgöz, Ö., Çelik, Z., & Öztürk, M. (2020). Meslek yüksekokullarında sektörel ilişkiler, yerindelik, arz-talep sorunu: İyileştirmeye yönelik öneriler. *Yükseköğretim Dergisi*, 10(3), 328-339.
- Hum, S. H., & Leow, L. H. (1996). Strategic manufacturing effectiveness: An empirical study based on the Hayes–Wheelwright framework. *International Journal of Operations & Production Management*, 16(4), 4-18.

- İŞKUR*. (2025, Aralık 03). <https://www.iskur.gov.tr/kurumsal/istatistikler/istatistik-yilliklari/> adresinden alındı
- İşseveroğlu, G., & Gençoğlu, Ü. G. (2011). Türkiye’de meslek yüksekokullarının bölge ihtiyaçlarına uygunluğu üzerine bir araştırma. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, 49, 24-36.
- Kaya, A. (2014). Meslek yüksekokulunda öğrenim gören öğrencilerin eğitim öğretim ve geleceğe yönelik düşünceleri. *Ondokuz Mayıs University Journal of Education Faculty*, 33(2), 349-356.
- Tekbalkan, M., & Sevim, B. (2016). Meslek yüksekokulu mezunlarının program bazında kamuda istihdamı: 2015 yılı örneği. *Organizing Committee Members*, 739, 523-537.
- Tuncer, M., & Tanaş, R. (2020). Meslek yüksekokulu öğrencilerinin mesleki eğitime yönelik tutumları ve gelecek beklentileri arasındaki ilişki. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(76), 1691-1707.
- Yurdakul, S., & Şahin-Demir, S. A. (2024). *Yükseköğretime bakış 2024: İzleme ve değerlendirme raporu*. Ankara: Eğitim-Bir-Sen Stratejik Araştırmalar Merkezi.
- Yükseköğretim Kanunu*. (2025, Aralık 03). Yükseköğretim Kanunu: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2547&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5> adresinden alındı

BÖLÜM 8

İMALAT SEKTÖRÜNDE ÇALIŞANLARIN İŞ TATMİNİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER (DÜZCE İLİ ÖRNEĞİ)

MUHAMMET ÇİL¹

Giriş

Günümüz çalışma yaşamında iş tatmini, yalnızca işin özelliklerine değil, çalışanların bireysel nitelikleri ve sosyal koşulları ile örgütün yönetim anlayışı ve çalışma şartlarının uyumuna bağlı olarak şekillenmektedir. Çalışanın beklenti ve ihtiyaçlarının karşılanması, iş tatminini artırmakta; bu durum örgüte yönelik olumlu tutumların ve bağlılığın güçlenmesini sağlamaktadır. İş tatmini yüksek olan çalışanların örgütten ayrılma eğilimi azalmakta, dolayısıyla iş tatmini örgütsel bağlılığın temel belirleyicilerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

İş tatmini kavramı ve tanımı

İş tatmini, çevresel, bireysel ve psikolojik etmenlerin etkileşimi sonucunda ortaya çıkan çok boyutlu bir kavramdır (Dugguh ve Ayaga, 2014). Yapılan çalışmalar, özellikle yönetici ve

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-7964-8525

iş arkadaşlarından algılanan desteğin çalışanların tutum ve davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Destekleyici bir çalışma ortamı, çalışanların işe ilişkin algılarını ve duygusal değerlendirmelerini olumlu yönde şekillendirmekte; bu durum iş tatmininin artmasına ve buna bağlı olarak bireysel performans ile örgütsel verimliliğin yükselmesine katkı sağlamaktadır (Kale, 2015).

Çalışanlar, emeklerinin karşılığında beklentilerinin karşılanmasını ve kişisel özellikleriyle uyumlu bir çalışma ortamında bulunmayı arzu etmektedir. Bireyin işten elde ettikleri ile işe ilişkin beklentileri arasındaki uyum düzeyi, iş tatmininin ortaya çıkmasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu uyumun sağlanması durumunda birey iş tatmini yaşarken, uyumsuzluk durumunda iş tatminsizliği söz konusu olmaktadır. İş tatmini kavramı, bilimsel araştırmalarda ve günlük yaşamda yaygın biçimde kullanılmasına rağmen, literatürde üzerinde uzlaşmış tek ve genel bir tanıma sahip değildir.

Literatürde iş tatmini kavramına ilişkin yapılan tanımlar, kavramın çok boyutlu ve öznel bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bazı araştırmacılar iş tatminini, bireyin işine yönelik memnuniyetini etkileyen psikolojik, fiziki ve çevresel faktörlerin bir bileşkesi olarak ele alırken, bazıları çalışanın işi aracılığıyla ihtiyaçlarını karşılama düzeyine vurgu yapmaktadır. Diğer tanımlarda ise iş tatmini, bireyin yaptığı işten duyduğu hoşnutluk derecesi ya da dışarıdan gözlemlenemeyen, yalnızca bireyin kendisi tarafından hissedilen keyif ve huzur durumu olarak ifade edilmektedir. Ayrıca, iş tatmininin yalnızca yapılan işin niteliğiyle sınırlı olmadığı; çalışma arkadaşları, yöneticiler ve örgütsel çevre gibi unsurlardan kaynaklanan memnuniyet duygularını da kapsadığı görülmektedir. Bu bağlamda iş tatmini, bireyin işine ve çalışma ortamına ilişkin algı ve değerlendirmelerinin bir sonucu olarak ortaya çıkan, çok yönlü bir tutum ve duygu durumu olarak

değerlendirilebilir (Akyüz ve Koçak, 2011; Gürsoy, 2013; Saklan, 2010; Spector, 1997; Tekingündüz, 2012).

İş tatminini etkileyen faktörler

Kişisel faktörler

Çalışanlar, yaptıkları işten elde edecekleri tatmin düzeyini ve bu doğrultuda izleyecekleri davranış biçimlerini, sahip oldukları bireysel özelliklere göre şekillendirmektedirler (Spector, 1997; Tekingündüz, 2012). Bireyin yaş, cinsiyet, eğitim düzeyi, iş deneyimi gibi demografik ve mesleki nitelikleri, iş tatmini üzerinde önemli bir belirleyici olarak kabul edilmektedir (Akyüz ve Koçak, 2011; Gürsoy, 2013). Bu çerçevede, kişisel özellikler ile iş tatmini arasındaki ilişki, çalışanların işlerinden aldıkları memnuniyet düzeyinin açıklanmasında temel bir değişken olarak ortaya çıkmaktadır.

Çalışanların iş tatmini düzeyleri, sahip oldukları bireysel özellikler tarafından belirgin biçimde etkilenmektedir. Cinsiyet bağlamında yapılan araştırmalar, erkek ve kadın çalışanların genel iş tatmin düzeylerinin birbirine yakın olduğunu göstermektedir; ancak tatmin yolları farklılık gösterebilmektedir. Bu farklılık, kadın ve erkeklerin işten beklenti ve ihtiyaçlarının farklı noktalara dayanmasına bağlanmaktadır (Sarıbay ve Sarıbay, 2016). Yaş faktörü incelendiğinde, genç çalışanların iş tatmin düzeylerinin yaşlı çalışanlara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, tecrübesizlik, mesleki uzmanlık eksikliği ve fazla iş beklentisi gibi etkenlerden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, iş tatmini genç yaşlarda yüksek seviyelerde başlarken, 30'lu yaşlarda düşüş göstermekte ve ilerleyen olgunluk dönemlerinde yeniden yükselmektedir (Özaydın ve Özdemir, 2014).

Medeni durum ile iş tatmini arasındaki ilişki ise tutarlı bulgular vermemekte, daha çok cinsiyetin medeni durum üzerindeki etkisine yönelik farklı sonuçlar elde edilmektedir. Kişilik özellikleri, iş tatminini etkileyen bir diğer önemli faktördür. İşini severek, isteyerek ve öz güvenle yapan çalışanlar, hem psikolojik olarak olumlu etkilenmekte hem de yöneticilerden ve örgütten olumlu geri bildirim almaktadır (Sarı, 2011). Zekâ kapasitesi, çalışanların iş süreçlerine uyumunu ve işi öğrenme hızını doğrudan etkilemektedir. Yüksek zekâ kapasitesine sahip bireyler işi daha hızlı öğrenmekte ve daha kolay uyum sağlarken, düşük zekâ kapasitesine sahip kişiler algılama güçlüğü yaşayarak uyum sürecinde daha fazla zaman harcamaktadır (Dönmez, 2013).

Hizmet süresi, çalışanın örgütte geçirdiği toplam süreyi göstermekte ve bu süre arttıkça çalışanların maaş, pozisyon ve iş yükü beklentileri yükselmektedir. Bu beklentiler karşılanmadığında iş tatmininde azalma meydana gelmekte, ancak uzun hizmet süresi, bireylerin daha mantıklı ve makul düşünme eğilimi geliştirmelerine ve iş tatmininin artmasına da katkıda bulunabilmektedir (Sıgır ve Basım, 2006). Son olarak, eğitim düzeyi, iş tatmini ile doğrudan ilişkilidir. Bireyin bilgi ve yeteneklerinin yaptığı işle uyumu ve öğrenim düzeyi, iş tatminini belirleyen önemli faktörlerdir. Eğitim seviyesi, işin gerektirdiği düzeyden daha yüksek olan bireyler, beklentilerinin karşılanmaması durumunda tatminsizlik yaşayabilmektedir (Yelboğa, 2007).

Örgütsel Faktörler

Çalışanların iş tatmini, yalnızca bireysel özelliklerden değil, aynı zamanda örgütsel faktörlerden de doğrudan etkilenmektedir. Ücret düzeyi, iş tatmininin temel belirleyicilerinden biridir. Çalışanlar, aldıkları ücret ile beklentilerini karşılaştırmakta ve bu denge sağlanmadığında memnuniyetsizlik ve tatminsizlik ortaya çıkmaktadır. Örgüt, personelini kendi amaç ve ilkeleri doğrultusunda

motive etmede güçlük yaşayabilir (Telman ve Ünsal, 2004). Benzer şekilde, ödüllendirme mekanizmaları da iş tatmini üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Çalışanlar, hak ettikleri veya beklediklerinin ötesinde maddi kazanımlar elde ettiklerinde, örgütleri ve üstleriyle olumlu ilişkiler kurmakta ve tatmin düzeyleri yükselmektedir (Solmuş, 2004).

Terfi olanakları, çalışanların iş tatminini artıran bir diğer önemli faktördür. Çalışanlar, işlerinde ustalaştıkça mevcut görevler kendilerine basit gelmeye başlar ve daha fazla yetki, sorumluluk ve yükselme imkânı talep ederler. Bu şartlar sağlandığında, çalışanlar hem statü hem de maddi olanaklar açısından avantajlı duruma geçer ve tatmin düzeyleri yükselir; aksi durumda iş gücü motivasyonu ve gayreti azalabilir (Eren, 2003; Ata, 2010).

Çalışma şartları, iş tatminini hem doğrudan hem de dolaylı olarak etkileyen bir diğer faktördür. Özellikle düzensiz çalışma saatleri, bireylerin aile ve sosyal yaşamını olumsuz etkileyerek özel hayatın bozulmasına yol açmaktadır (Erdil ve Keskin, 2004). Bunun yanı sıra, çalışma arkadaşlarıyla ilişkiler, iş tatmininin sosyal boyutunu oluşturmaktadır. Birey, iş yerinde çalışma arkadaşlarıyla sağlıklı ve uyumlu ilişkiler kurduğunda tatmin düzeyi artmakta, ortak kültürel değerler ve benzer yapıların varlığı bireyin iş yerinde rahat davranmasına ve örgütten keyif almasına olanak sağlamaktadır. İyi bir çalışma ortamı, çalışanların işten duyduğu memnuniyeti artırmakta ve motivasyonu desteklemektedir (Urhan, 2014).

Materyal ve Yöntem

Araştırma kapsamında belirlenen amaçlara ulaşabilmek için öncelikle ilgili işletmelerde çalışan bireylerin bazı demografik özellikleri tespit edilmiştir. Bu çalışma, mobilya ve makine sektörlerinde faaliyet gösteren işletmelerde çalışanların iş tatminine etki eden faktörleri ortaya koymayı amaçlamaktadır. Araştırma,

Düzce il merkezi ve ilçelerinde faaliyet gösteren işletmeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) sanayi veri tabanı kayıtlarına göre, Düzce il merkezi ve ilçelerinde mobilya ve makine sektörlerinde faaliyet gösteren işletmelerde toplam 2.785 çalışan olduğu tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında evreni temsil edecek örneklem hesaplanırken, TOBB sanayi veri tabanında yer alan çalışan sayıları göz önünde bulundurulmuştur. Örneklem büyüklüğünün belirlenmesinde aşağıdaki formül (1.1) ve parametreler dikkate alınmıştır (Lemeshow, 2025);

$$n = \frac{Z^2 \cdot N \cdot P \cdot Q}{N \cdot D^2 + Z^2 \cdot P \cdot Q} \quad (1.1)$$

N: Evren,

n:Örnek büyüklüğü,

Z:Güven katsayısı (%95'lik güven katsayısı 1,96 alınmıştır),

P:Ölçülmek istenen özelliğin evrende bulunma olasılığı (%50 olarak alınmıştır),

Q:Ölçülmek istenen özelliğin evrende bulunmama olasılığı (%50 olarak alınmıştır),

D:Kabul edilen örnekleme hatası (%10 olarak belirlenmiştir).

Çalışan sayısının hesaplanmasında, kabul edilen örnekleme hatası %10 dikkate alınmıştır. Araştırma evreni, makine ve mobilya sektörlerinde faaliyet gösteren toplam 2.785 çalışanı kapsamaktadır. Hesaplamalar sonucunda, araştırma kapsamında ulaşılması gereken minimum örneklem büyüklüğü 93 çalışan olarak belirlenmiştir. Veri toplama süreci sonunda, araştırmacı tarafından toplam 150 adet değerlendirilebilir anket elde edilmiştir.

Çalışmada çıkarımsal istatistiksel analiz yapılabilmesi için anket formundan yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan

anket formu 2 bölümden, 33 farklı soru ve toplam 77 yargıdan oluşturulmuştur. Çalışma esnasında kullanılan anket formunun birinci bölümünde katılımcıların bazı demografik özellikleri sorgulanmıştır. Anket formunun ikinci bölümünde ise katılımcıların iş tatminini etkileyen faktörlere yönelik sorular ele alınmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan anket formunda hem açık uçlu hem de likert tarzı sorulardan yararlanılmıştır. Tasarlanan anket formu Düzce ilinde faaliyette bulunan işletmelere ulaştırılarak ve yüz yüze anket tekniği uygulanarak veriler elde edilmiştir.

Çalışmada anket uygulaması sonrasında elde edilen veriler SPSS sürüm 22.0 paket programında değerlendirilmek üzere kodlanarak, bir veri seti oluşturulmuştur (SPSS, 2003). Oluşturulan bu veri seti yardımıyla istatistiksel değerlendirmeler yapıp elde edilen bulgular üzerinden sonuç ve önerilerde bulunulmuştur.

Bulgular ve Tartışma

Katılımcıların bazı demografik özellikleri

Katılımcı çalışanlara ait demografik bilgiler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1 Katılımcılara ait demografik özelliklerin değerlendirilmesi

Demografik Bilgi		Sıklık	Yüzde	Demografik Bilgi		Sıklık	Yüzde
Medeni durum	Evli	88	58.7	Çalışma süresi (yıl)	0-5	75	50.0
	Bekâr	62	41.3		6-10	43	28.7
	Toplam	150	100		11-15	18	12.0
Cinsiyet	Kadın	16	10.7		16-20	14	9.3
	Erkek	134	89.3		Toplam	150	100
	Toplam	150	100	Mesleki deneyim (yıl)	0-5	41	27.3
Yaş (yıl)	20-30	56	37.3		6-10	68	45.3
	31-40	52	34.7		11-15	23	15.3
	41-50	23	15.3		16-20	18	12.0
	51-60	19	12.7		Toplam	150	100
	Toplam	150	100	Çalışılan bölüm	Üretim	147	98.0
Eğitim	İlköğretim	14	9.3		Bakım-onarım	3	2.0
	Lise	127	84.7		Toplam	150	100
	Ön lisans	9	6.0	Çalışma düzeni	Vardiyalı	101	67.3
	Toplam	150	100		Vardiyasız	49	32.7
Faaliyet	Mobilya	87	58.0		Toplam	150	100
	Makine	63	42.0	Aylık	22000-27000	37	24.7

	Toplam	150	100	gelir (TL)	27001-32000	66	44.0
Günlük çalışma süresi (saat)	<5	4	2.6		32001-37000	26	17.3
	5-8	136	90.7		37000>	21	14.0
	9-12	10	6.7		Toplam	150	100
	Toplam	150	100				
Meslek hastalığı	Evet	15	10.0	Geçmişte iş kazası	Evet	18	12.0
	Hayır	135	90.0		Hayır	132	88.0
	Toplam	150	100		Toplam	150	100

Tablo 1’de çalışmaya katılan bireylerin demografik özelliklerine ilişkin bulgular gösterilmiştir. Bu bulgulara göre katılımcıların %58.7’si evli, %41.3’ü ise bekârdır. Cinsiyet dağılımı incelendiğinde, katılımcıların büyük çoğunluğunun erkek (%89.3) olduğu, kadın katılımcı oranının ise %10.7 ile sınırlı kaldığı görülmektedir.

Yaş dağılımına bakıldığında katılımcıların %37.3’ünün 20-30 yaş, %34.7’sinin 31-40 yaş aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, örneklemin ağırlıklı olarak genç ve orta yaş grubundan oluştuğunu göstermektedir. Eğitim düzeyi açısından katılımcıların büyük bir kısmının lise mezunu (%84.7) olduğu, bunu ilköğretim (%9.3) ve ön lisans (%6) mezunlarının izlediği görülmektedir.

Katılımcıların çalışma süresi incelendiğinde, %50’sinin 0-5 yıl, %28.7’sinin 6-10 yıl arasında çalışma süresine sahip olduğu saptanmıştır. Benzer şekilde mesleki deneyim açısından da katılımcıların önemli bir bölümünün 6-10 yıl (%45.3) ve 0-5 yıl (%27.3) aralığında deneyime sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, örnekleme görece düşük ve orta düzeyde mesleki deneyime sahip bireylerin ağırlıkta olduğunu göstermektedir.

Çalışılan bölüme göre dağılım incelendiğinde, katılımcıların neredeyse tamamının üretim bölümünde (%98) çalıştığı, çok küçük bir kısmının ise bakım-onarım (%2) bölümünde görev aldığı belirlenmiştir. Çalışma düzeni açısından katılımcıların %67.3’ünün vardiyalı, %32.7’sinin vardiyasız çalıştığı görülmektedir. Faaliyet alanına göre dağılımda ise katılımcıların %58’inin mobilya, %42.0’sinin makine sektöründe faaliyet gösterdiği saptanmıştır.

Günlük çalışma süresi değerlendirildiğinde, katılımcıların büyük çoğunluğunun günde 5-8 saat (%90.7) çalıştığı, 9-12 saat çalışanların oranının %6.7, 5 saatin altında çalışanların oranının ise %2.6 olduğu belirlenmiştir. Aylık gelir dağılımı incelendiğinde, katılımcıların en yüksek oranla 27.001-32.000 TL (%44) gelir grubunda yer aldığı, bunu 22.000-27.000 TL (%24.7) ve 32.001-37.000 TL (%17.3) gelir gruplarının izlediği görülmektedir.

Son olarak, katılımcıların %10'unun meslek hastalığına sahip olduğu, %12'sinin geçmişte iş kazası geçirdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, örneklemde meslek hastalığı ve iş kazası oranlarının görece düşük olmakla birlikte tamamen ihmal edilemeyecek bir düzeyde olduğunu göstermektedir. Genel olarak tablo, araştırma grubunun ağırlıklı olarak erkek, lise mezunu, üretim bölümünde çalışan ve vardiyalı çalışma düzenine sahip bireylerden oluştuğunu ortaya koymaktadır.

Çalışanlara yönelik iş tatminine etki eden faktörlerin değerlendirilmesi

Katılımcı çalışanlara yönelik iş tatminini etkileyen faktörlerden biri olan ücret ve ödüllendirme ile ilgili elde edilen bulgular, Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2 Çalışanların iş tatmininde ücret ve ödüllendirme algılarına ilişkin yargılar (1:Kesinlikle katılmıyorum; 5:Kesinlikle katılıyorum)

Yargılar	Ortalama	Standart Sapma
Şirketimizde uygulanan takdir ve ödül sistemi adil ve yerindedir	3.63	1.108
İyi bir iş çıkardığımda şirketim bunu takdir ediyor	3.41	0.898
Çabalarımın hak ettiği şekilde ödüllendirildiğini hissediyorum	3.20	0.941
Şirketim iyi yapılan işleri ödüllendirmek için iyi bir mekanizmaya sahiptir	3.15	0.910
Yaptığım işin takdir edildiğini hissediyorum	3.00	1.023
Yıllık maaş artışlarından memnunum	2.89	1.004
Yaptığım iş için adil bir maaş alıyorum	2.72	0.836
Ekstra mesai ödemelerinden memnunum	2.63	0.929

Tablo 2 incelendiğinde, çalışanların iş tatmini bağlamında en yüksek ortalama değerinin 3.63 ile “Şirketimizde uygulanan takdir ve ödül sistemi adil ve yerindedir” ifadesinde olduğu görülmektedir. Bu sonuç, katılımcı çalışanların şirketin takdir ve ödül sistemini genel olarak adil ve uygun bulduklarını göstermektedir. Buna karşın, en düşük ortalama değerinin 2.63 ile “Ekstra mesai ödemelerinden memnunum” ifadesinde olduğu görülmektedir.

Katılımcı çalışanlara yönelik iş tatminini etkileyen faktörlerden biri olan terfi ve kariyer fırsatları ile ilgili elde edilen bulgular, Tablo 3’de sunulmuştur.

Tablo 3 Çalışanların iş tatmininde terfi ve kariyer fırsatlarına ilişkin yargılar (1:Kesinlikle katılmıyorum; 5:Kesinlikle katılıyorum)

Yargılar	Ortalama	Standart Sapma
Çalışanlar burada, başka yerlerde olduğu kadar hızlı yükseliyor	3.24	1.133
Şirketimiz adil bir terfi politikası izliyor	3.23	0.972
Şirketimdeki kariyer fırsatlarından memnunum	3.10	0.925
Şirketimizde terfide performans önemli faktörlerden biridir	3.09	0.785
Şirketimiz çalışanlara mesleki gelişim için yeterli fırsatlar sunuyor	3.07	0.873
Terfi için sunulan fırsatlardan memnunum	2.70	0.974

Tablo 3 incelendiğinde, çalışanların kariyer ve terfi algısı bağlamında en yüksek ortalama değerinin 3.24 ile “Çalışanlar burada, başka yerlerde olduğu kadar hızlı yükseliyor” ifadesinde olduğu görülmektedir. Buna karşın, en düşük ortalama değerinin 2.70 ile “Terfi için sunulan fırsatlardan memnunum” ifadesinde olduğu görülmektedir.

Katılımcı çalışanlara yönelik iş tatminini etkileyen faktörlerden biri olan yönetici ve liderlik ilişkisi ile ilgili elde edilen bulgular, Tablo 4’de gösterilmiştir.

Tablo 4 Çalışanların iş tatmininde yönetici ve liderlik ilişkisine yönelik yargılar (1:Kesinlikle katılmıyorum; 5:Kesinlikle katılıyorum)

Yargılar	Ortalama	Standart Sapma
Yöneticim bana adil davranıyor	3.66	1.054
Yöneticim çalışanların kurumsal kararlara katkılarını dikkate alıyor	3.61	1.022
Yöneticim benim düşüncelerimi önemsiyor	3.59	1.024
Yöneticim çalışanların gelişmesine önem veriyor	3.37	0.922
Yöneticim fikirlerimi ifade etmemi teşvik ediyor	3.15	0.929
Yöneticim çalışanların karar alma gücünü teşvik ediyor	3.11	0.927
Yöneticim çalışanlara danışmadan karar vermiyor	2.98	0.802

Tablo 4 incelendiğinde, çalışanların yönetici algısı bağlamında en yüksek ortalama değeri 3.66 ile “Yöneticim bana adil davranıyor” ifadesinde gözlemlenmektedir. Buna karşın, en düşük ortalama değeri 2.98 ile “Yöneticim çalışanlara danışmadan karar vermiyor” ifadesinde görülmektedir.

Katılımcı çalışanlara yönelik iş tatminini etkileyen faktörlerden biri olan sosyal yardım ve hizmetler ile ilgili elde edilen bulgular, Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5 Çalışanların iş tatmininde sosyal yardım ve hizmetlere ilişkin yargılar (1:Kesinlikle katılmıyorum; 5:Kesinlikle katılıyorum)

Yargılar	Ortalama	Standart Sapma
Aldığım sosyal yardımlar, diğer işletmelerin sundukları kadar iyidir	3.73	1.027
Şirketin sağlık hizmetlerinden memnunum	3.71	1.143
Aldığım sosyal yardımlardan memnunum	3.55	0.916
Şirketin ulaşım hizmetlerinden memnunum	3.49	0.960
Şirketimden aldığım sosyal yardım paketi, iş arkadaşlarımla eşdeğerdir	3.37	0.945
Şirketin sosyal faaliyetlerinden memnunum	3.21	1.082
Şirketin yemekhane hizmetlerinden memnunum	3.20	1.055
Şirketin kazazede çalışanlara sunduğu yardımlardan memnunum	3.11	1.069

Tablo 5 incelendiğinde, katılımcıların sosyal yardım ve hizmetlere ilişkin memnuniyet düzeyleri ortalama değerler üzerinden değerlendirilebilir. En yüksek ortalama 3.73 ile “Aldığım sosyal yardımlar, diğer işletmelerin sundukları kadar iyidir” ifadesinde gözlenmektedir. Buna karşılık, en düşük ortalama 3.11 ile

“Şirketin kazazede çalışanlara sunduğu yardımlardan memnunum” ifadesinde elde edilmiştir.

Katılımcı çalışanlara yönelik iş tatminini etkileyen faktörlerden biri olan çalışma arkadaşları ve sosyal ilişkiler ile ilgili elde edilen bulgular, Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6 Çalışanların iş tatmininde çalışma arkadaşları ve sosyal ilişkilere yönelik yargılar (1:Kesinlikle katılmıyorum; 5:Kesinlikle katılıyorum)

Yargılar	Ortalama	Standart Sapma
Çalışma arkadaşlarımı seviyorum	3.67	0.832
Çalışma arkadaşlarımla iyi vakit geçiriyorum	3.40	0.759
Amirlerim ve iş arkadaşlarımla ilişkilerimin iyi olduğunu düşünüyorum	3.36	0.906
Çalışma arkadaşlarım yetersiz oldukları için üzerimdeki yükün fazla olduğunu düşünüyorum	3.17	1.014
İş yerinde çok fazla anlaşmazlık ve sözlü tartışma oluyor	3.09	0.929
Şirket içinde iletişim iyi görünüyor	2.93	0.917

Tablo 6 irdelendiğinde, katılımcı çalışanların iş yeri ilişkilerine dair memnuniyet ve algıları değerlendirilmektedir. En yüksek ortalama değer 3.67 ile “Çalışma arkadaşlarımı seviyorum” ifadesinde gözlemlenmiştir. Bu durum, çalışanların genel olarak iş arkadaşlarına yönelik olumlu duygular taşıdığını ve sosyal ilişkilerden memnuniyet duyduğunu göstermektedir. Buna karşılık, en düşük ortalama değer 2.93 ile “Şirket içinde iletişim iyi görünüyor” ifadesinde elde edilmiştir.

Sonuç ve Öneriler

Çalışma bulgularına yönelik sonuçlar, çalışanların takdir ve ödüllendirme sistemini genel olarak olumlu algıladıklarını, ancak maddi ödüllendirme unsurlarında, özellikle ekstra mesai ödemelerinde memnuniyetin düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum, iş tatmininin artırılmasında adil ve şeffaf bir maddi ödüllendirme mekanizmasının önemini vurgulamaktadır. Bu nedenle, şirketin maaş ve ek ödeme uygulamalarını gözden geçirerek

düzenlemeler yapması, çalışan memnuniyeti ve verimliliğin artırılmasına katkı sağlayabilir.

Elde edilen sonuçlar, çalışanların kariyer ve terfi süreçlerini genel olarak kısmen olumlu algıladıklarını göstermektedir. Çalışanlar, yükselme hızını diğer kuruluşlarla kıyasladıklarında olumlu değerlendirmeler yaparken, terfi için sunulan fırsatlardan memnuniyetin görece düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, yönetimin kariyer planlaması ve terfi politikalarını gözden geçirerek, çalışanların gelişim beklentilerini karşılayacak ve terfi fırsatlarını daha adil ve erişilebilir hâle getirecek düzenlemeler yapması önerilmektedir.

Katılımcı çalışanlar yöneticilerini genel olarak adil ve görüşlerine değer veren kişiler olarak algılamakla birlikte, karar alma süreçlerinde tam katılımın sağlanmadığı görülmektedir. Bu nedenle, yönetimin çalışan katılımını artıracak uygulamalar geliştirmesi önerilmektedir.

Katılımcı çalışanların, sosyal yardımların sektörel karşılaştırmada görece yüksek memnuniyet düzeyini belirtmeleri, şirket politikalarının genel olarak olumlu algılandığını gösterirken, kazazede çalışanlara yönelik yardımların görece düşük memnuniyeti, bu alanda iyileştirme yapılması gerektiğine işaret etmektedir.

Elde edilen sonuçlar, katılımcı çalışanların sosyal ilişkilerden genel olarak memnun olduğunu, ancak şirket içi iletişimin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu doğrultuda, iletişim süreçlerinin güçlendirilmesi, anlaşmazlıkların etkin yönetilmesi ve sosyal etkinliklerin artırılması önerilmektedir.

Genel olarak sonuçlar, çalışanların kişilerarası ilişkiler ve bazı yönetsel uygulamalardan memnun olmakla birlikte, ücret politikaları, terfi olanakları ve kurumsal iletişim alanlarında geliştirmelere ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

Kaynakça

- Akyüz, B., & Koçak, R. (2011). İş tatmini ve örgütsel bağlılık arasındaki ilişki: Bir alan araştırması. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 25(2), 1-17.
- Ata, A. (2010). Kariyer yönetimi ve örgütsel bağlılık ilişkisi. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 2(4), 1-20.
- Dönmez, B. (2013). Zekâ ve örgütsel uyum ilişkisi üzerine bir değerlendirme. *Eğitim ve Toplum Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 45–60.
- Dugguh, S. I., & Ayaga, D. (2014). Job satisfaction theories: Traceability to employee performance in organizations. *Journal of Business and Management*, 16(5), 11–18.
- Erdil, O., & Keskin, H. (2004). Güçlendirme uygulamalarının iş tatmini üzerindeki etkileri. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 33(1), 1–16.
- Eren , E. (2003). *Örgütsel davranış ve yönetim psikolojisi* (7. b.). Ankara: Beta Yayınları.
- Gürsoy, S. (2013). İş tatmini ve örgütsel bağlılık ilişkisi. *Çalışma ve Toplum*, 3, 145-168.
- Kale, E. (2015). Algılanan örgütsel destek ile iş tatmini arasındaki ilişki. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 13(1), 123–140.
- Lemeshow, S. (2025). *Sampling of populations: Methods and applications* (5th b.). ABD: Wiley.
- Özaydın, M. M., & Özdemir, O. (2014). Yaş faktörünün iş tatmini üzerindeki etkisi. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, 3(4), 702–719.

- Saklan, A. (2010). Kamu çalışanlarında iş tatmini ve motivasyon ilişkisi. *Kamu Yönetimi Dergisi*, 43(2), 75–98.
- Sarı, E. (2011). Kişilik özelliklerinin iş tatmini üzerindeki etkisi. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(19), 523–531.
- Sarıbay , A., & Sarıbay, B. (2016). Cinsiyetin iş tatmini üzerindeki etkisi. *Çalışma İlişkileri Dergisi*, 7(1), 33–49.
- Sıgır, Ü., & Basım, H. N. (2006). İş tatmini ve örgütsel bağlılık ilişkisi. *Hacettepe Üniversitesi İİBF Dergisi*, 24(2), 131–154.
- Solmuş, T. (2004). *İş yaşamında duygular ve kişilerarası ilişkiler*. Ankara: Beta Yayınları.
- Spector, P. E. (1997). *Job satisfaction: Application, assessment, causes, and consequences*. ABD: Sage Publications.
- SPSS Inc. (2003). *SPSS for Windows, Version 22.0*. ABD: SPSS Inc.
- Tekingündüz, S. (2012). İş tatmini ve örgütsel bağlılık arasındaki ilişki. *Sağlıkta Performans ve Kalite Dergisi*, 4(2), 1–20.
- Telman, N., & Ünsal, P. (2004). *Çalışan memnuniyeti*. İstanbul: Epsilon Yayınları.
- Urhan, B. (2014). Çalışma ortamı ve iş tatmini ilişkisi. *Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(1), 89–104.
- Yelboğa, A. (2007). Eğitim düzeyi ile iş tatmini arasındaki ilişki. *Kamu-İş Dergisi*, 9(2), 57–74.

BÖLÜM 9

ORMAN ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİNDE YAŞLI TÜKETİCİLERE YÖNELİK YARATICI ÜRÜN TASARIMI

Ahmet Bora KIRKLIKÇI¹
Serap BAYRAM²

Giriş

Yaşlanma, biyolojik, psikolojik ve sosyal süreçlerin bir arada işlediği kapsamlı bir dönüşümdür ve bu dönüşüm, bireyin çevresiyle kurduğu etkileşimi doğrudan etkiler (WHO, 2015). Küresel demografik dönüşüm, son yıllarda hem sosyal bilimlerde hem de endüstriyel tasarım alanında en çok tartışılan olguların başında gelmektedir. Birleşmiş Milletler'in 2023 Yaşlanma Raporu'na göre dünya genelinde 65 yaş ve üzeri nüfusun 2050 yılına kadar 1,6 milyara ulaşacağı öngörülmektedir. Bu dramatik artış yalnızca nüfus yapısını değiştirmemekte, aynı zamanda yaşam alanlarının, tüketim ürünlerinin ve endüstriyel üretim modellerinin yeniden düşünülmesini zorunlu kılmaktadır (UN, 2023). Yaşlı bireylerin gündelik yaşam pratikleri mobilite, duyuşsal fonksiyonlar, bilişsel

¹ Doç. Dr., Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, TBMYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Orcid: 0000-0002-0401-8182

² Doç. Dr., Düzce Üniversitesi, SHMYO, Sağlık ve Bakım Hizmetleri Bölümü, Orcid: 0000-0001-9969-4759

süreçler ve güvenlik algısı bakımından genç nüfustan belirgin farklılıklar göstermektedir (WHO, 2015). Dolayısıyla yaşlı nüfusun ihtiyaçlarına duyarlı bir ürün ekosisteminin geliştirilmesi, günümüz üretim sektörleri için stratejik bir gerekliliktir.

Orman ürünleri endüstrisi, bu dönüşüm bağlamında özel bir konuma sahiptir. Ahşap temelli ürünlerin fiziksel, duyuşsal ve psikolojik özellikleri yaşlı bireylerin yaşam kalitesini destekleme potansiyeli taşımaktadır. Ahşap malzeme, diğer yapı ve mobilya materyallerine kıyasla sıcaklık hissi, düşük ısı iletkenlik, dokunsal konfor, akustik düzenleme kapasitesi ve biyofilik etkiler gibi bir dizi avantaja sahiptir (Ikei, Song & Miyazaki, 2017; Burnard & Kutnar, 2015). Bu nitelikler, yaşlıların konut içi güvenliği, ergonomik gereksinimleri ve psikososyal iyilik hâli açısından kritik öneme sahiptir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, doğal malzemelerin bilişsel stres yanıtlarını azalttığını, iç mekân konforunu artırdığını ve özellikle ileri yaş gruplarında çevresel memnuniyeti yükselttiğini göstermiştir (Nyrud & Bringslimark, 2010; Fell, 2010; Kwak & Choi, 2025).

Yaşlı bireyler günlük yaşamlarının yüzde 80'ini iç mekânlarda geçirmektedir; bu süre bakım evlerinde ve destekli yaşam birimlerinde daha da yüksektir (WHO, 2021). Bu nedenle mekânsal donanımlar, oturma mobilyaları, depolama elemanları, zemin kaplamaları ve tutunma sistemleri yalnızca işlevsel ürünler değil, aynı zamanda güvenlik ve yaşam doyumunu belirleyen çevresel faktörlerdir. Ancak yaşlı bireylerin %50-75'i mobilyaların bulunduğu konuma sabitlenmediğini, mobilya ve yüzeylerdeki sivri kenar/köşelerde uygun önlemlerin alınmadığını, yaşadıkları konutun iç mekânında kaygan zeminlerin ve eşiklerin varlığını belirtmiştir (Büker, Şavkın & Büker, 2023). Orman ürünleri sektörü, hem malzeme çeşitliliği hem de üretim teknolojilerindeki hızlı gelişme sayesinde yaşlı bireylerin gereksinimlerine uygun, güvenli, estetik,

sürdürülebilir ve yüksek performanslı ürünler geliştirme potansiyeline sahiptir.

Özellikle son beş yılda endüstri 4.0 uygulamalarının yaygınlaşması, sensör teknolojilerinin mobilyalara entegrasyonu, biyobazlı kaplamaların geliştirilmesi ve modüler üretim sistemlerinin olgunlaşması, yaşlı dostu ürünlerin kişiye özel tasarlanmasını mümkün kılmıştır. CNC kontrollü üretim hatları, robotik montaj sistemleri ve dijital ikiz teknolojileri, ergonomik hassasiyet gerektiren ürünlerde hata payını azaltarak daha güvenli ve tutarlı ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Ramos-Maldonado & Aguilera-Carrasco, 2021). Bu yenilikler, ahşap sektörünü geleneksel bir üretim alanı olmaktan çıkarıp teknoloji odaklı, kullanıcı ihtiyaçlarına duyarlı bir endüstri konumuna taşımıştır.

Bununla birlikte yaşlı tüketicilere yönelik ürün geliştirme yalnızca teknolojik olanaklarla açıklanamayan çok boyutlu bir gereksinimler dizisini dikkate almayı gerektirir. Tasarımcılar ve üreticiler fiziksel kapasite değişimlerinin yanı sıra görsel ve işitsel duyuşsal kayıplar, kavrama gücünde azalma, denge sorunları, kronik hastalıklar, bilişsel yavaşlama ve psikososyal faktörleri de analiz etmek zorundadır. Bu bağlamda ergonomi, evrensel tasarım, biyofilik tasarım ve insan-merkezli tasarım yaklaşımları yaşlılara yönelik ürün geliştirme süreçlerinin bilimsel çerçevesini oluşturmaktadır (Probst & ark., 2024; Schaie, 2024; Youn, Kang & Lee, 2025).

Orman ürünleri endüstrisinin yaşlı dostu ürün tasarımıındaki rolü yalnızca bireysel refah açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma hedefleri bağlamında da önem taşımaktadır. Ahşap malzeme doğası gereği düşük karbon ayak izine sahiptir; çevresel sürdürülebilirliği artırırken, yenilenebilir kaynak kullanımıyla döngüsel ekonomi ilkelerine katkıda bulunur. Bu durum hem toplum sağlığına hem de çevresel stratejilere uyumlu bir

Üretim modelini desteklemektedir (Kırklıkçı & Gültekin 2023, Kırklıkçı, 2023)

Bu kitap bölümü, yaşı tüketicilere yönelik orman ürünlerinin tasarımı, üretimi ve teknolojik dönüşümünü akademik bir bakış açısıyla incelemektedir. Bölümün ilerleyen kısımlarında önce yaşı bireylerin gereksinimlerine ilişkin bir ereve sunulacak, ardından orman ürünlerinde tasarım süreçleri, malzeme inovasyonları ve ürün kategorileri analiz edilecek, son olarak da teknolojinin sektörü nasıl dönüştürdüğü tartışılacaktır.

Yaşı Tüketicilerin Gereksinimleri: Demografik, Fiziksel, Duyusal ve Psikososyal Boyutlar

Küresel nüfusun hızla yaşılanması, tüketim kalıplarında önemli bir değişime yol açmıştır. Birleşmiş Milletler'in 2023 verileri, yaşı nüfusun yalnızca niceliksel olarak artmakla kalmadığını, aynı zamanda sosyoekonomik yapısının da dönüşmekte olduğunu göstermektedir. Daha uzun yaşam süresi, daha yüksek eğitim düzeyi, dijitalleşmeye artan uyum ve gelir dağılımındaki değişimler, yaşı tüketicilerin mal ve hizmetlere ilişkin beklentilerini yeniden şekillendirmektedir (UN, 2023). Yaşı yetişkinler geçmişte daha çok sağlık odaklı ürünleri talep eden pasif tüketiciler olarak değerlendirilirken, günümüzde bağımsız yaşamı destekleyen, estetik açıdan tatmin sağlayan ve kişiselleştirilebilir ürünleri tercih eden aktif bir kullanıcı profiline dönüşmektedir (Schaie, 2024).

Yaşı bireylerin büyük bir kısmı yaşamlarının çoğunu konut içinde geçirmekte, dolayısıyla i mekân tasarımı tüketim eğilimlerini belirleyen başlıca faktörlerden biri hâline gelmektedir (Oswald & Wahl, 2005). Yaşı bireylerin mobilya ve yapı malzemeleri seçiminde güvenlik, ergonomi, erişilebilirlik ve duyusal konforun birincil kriterler olmalıdır. Bu bağlamda orman ürünleri, özellikle doğal dokusu, düşük ısıl iletkenliği ve estetik çeşitliliği nedeniyle yaşı tüketicilerin konut içi tercihlerinde ne çıkmaktadır. İ

mekânlarda ahşap içerikli yüzeylerin sıcaklık algısını artırıp mekânsal cazibeyi yükselttiği ve katılımcıların duygusal açıdan olumlu tepkiler vermesini desteklediği bildirilmiştir (Kwak & Choi, 2025). İç mekânda %30-45 oranında ahşap kaplama kullanılan ortamlarda yaşlı bireylerin algılanan konfor düzeyi %18-25 artmış, kalp atım hızı ortalama %6-8 azalmıştır. Ancak, %60 üzeri ahşap kaplamada görsel yorgunluk ve kabul düzeyi düşmüştür. Bu sonuçlar daha fazla ahşap kullanımının her zaman daha iyi olmadığını ve optimum oranın yaşlı kullanıcı memnuniyetini belirlediğini göstermiştir (Yan & Guo, 2023).

İlerleyen yaşla birlikte ortaya çıkan fizyolojik değişimler (kas gücü kaybı, duysal azalma), bilişsel süreçlerde yavaşlama ve psikososyal rollerin dönüşümü, bireyin gündelik yaşam aktivitelerini yerine getirme biçimini önemli ölçüde etkilemektedir (Lawton & Nahemow, 1973; Rosenberg & ark., 2013). Yaşlanma ile birlikte kas-iskelet sistemi fonksiyonlarında belirgin değişiklikler meydana gelmektedir. Sarkopeni, osteoartrit, kemik mineral yoğunluğunda azalma, eklem hareket açıklığında daralma ve koordinasyon sorunları yaşlı bireylerde en yaygın fiziksel zorluklar arasında yer almaktadır (Dupont, 2018; Hunter & Bierma-Zeinstra, 2019). Bu fizyolojik değişimler, oturma-kalkma, yürüme, eğilme, kavrama ve nesneleri kaldırma gibi temel gündelik yaşam aktivitelerini doğrudan etkileyerek yaşlı bireylerin bağımsızlık düzeyini ve yaşam kalitesini azaltmaktadır. Kas gücünde 65 yaş sonrası her yıl ortalama yüzde 1 ila 2 arasında azalma yaşandığı ve bunun özellikle üst ekstremitate fonksiyonlarını belirgin biçimde sınırladığı belirtilmektedir (Dupont, 2018). 85 yaş ve üstü katılımcılarda yavaş yürüme hızı ya da zayıf kavrama gücü %74 bulunmuştur (Dodds & ark., 2017). Wang & ark. (2018) yaşlı bireylerde kavrama kapasitesinin genç yetişkinlere kıyasla yüzde 20 ila 40 oranında daha düşük olduğunu bildirmektedir.

Bu durum, mobilya ve diğ er ahşap ürünlerde belirli tasarım kriterlerini zorunlu kılmaktadır. Kavrama gücünde d      olması nedeniyle  ekmece kulpları, kapı kolları ve tutunma elemanları geniş, yuvarlatılmış ve dokunsal geri bildirim sağlayan formda olmalıdır. Oturma yüksekliğinin d      olması yaşlılarda kalkmayı zorla tırırken, çok yüksek oturma yüzeyleri oturma sırasında denge kaybına yol açabilir. Ya lı bireylerde koltuk yüksekliği kullanıcının diz arkası yüksekliğine (H mm) veya 25 mm altına ayarlandığında ve sırtlık eğimi yaklaşık 105  olduğunda optimum konfor ve düzgün basınç dağılımı elde edildiği bildirilmiştir (Lyu & ark., 2025). Ergonomik yeniden tasarlanmış ahşap koltuklarda ya lı bireylerin oturma-kalkma sırasında kas-iskelet zorlanması %32 azalmış ve kullanıcıların %81'i bağımsız hareket hissinin arttığını bildirmiştir (Zhou & ark., 2022).

Ya lanmayla birlikte duysal sistemlerde gerileme ortaya çıkar. Görme yetisindeki azalma, kontrast duyarlılığının d     , renk algısındaki değişimler ve parlama hassasiyetinin artması ya lı yetişkinlerde yaygındır. Owsley (2011) ya lı bireylerde kontrast duyarlılığının yüzde 40'a kadar d     diğini ve bunun özellikle mekânsal yön bulma becerisini olumsuz etkilediğini vurgulamaktadır. Ahşap yüzeylerin doğal renk paleti, özellikle sıcak ve orta tonların görsel algı açısından daha avantajlı olması nedeniyle ya lı kullanıcılar için uyumlu bir seçimdir. Mat vernikler parlama sorununu azaltarak görsel konforu yükseltir.

İşitme sistemindeki değişimler de ya lanmanın önemli bir boyutudur. Presbiakuzi olarak bilinen ya a bağlı işitme kaybı, özellikle yüksek frekanslı seslerin duyulmasını zorlaştırır. Bu bağlamda akustik düzenleme sağlayan malzemelere duyulan ihtiyaç artmaktadır. Ahşap panellerin yankıyı azaltıcı etkisi çeşitli çalışmalarda doğrulanmış olup, bu özellik özellikle işitme cihazı kullanan ya lı bireyler için çevresel gürültü yönetiminde büyük avantaj sağlar (Kuttruff & Vorl nder, 2024).

Dokunma duyusundaki değişimler, özellikle periferik nöropati ve duyu kaybı yaşayan bireylerde ellerin yüzeylerle temasını daha kritik hâle getirir. Ahşap yüzeylerin düşük ısı iletkenliği, sıcak bir temas hissi yaratması ve doğal lifli yapısı yaşlı bireylerde dokunsal konfor sağlar. Stevens (2005) ileri yaşlarda dokunsal algı kaybına rağmen doğal malzemelerin sağladığı dokunsal bütünlüğün güven hissini artırdığını belirtmiştir. Bu nedenle tutunma çubukları, kolçaklar ve kullanım yüzeylerinin ahşap malzemeden üretilmesi hem duyuşal hem de psikolojik konfor açısından önemli bir tasarım stratejisidir.

Denge sistemi de yaşlanmanın etkilediği temel duyuşal alanlardan biridir. Kaymaz ahşap yüzeyler, yuvarlatılmış kenarlar ve ergonomik tutunma elemanları bu açığı kapatmaya yönelik etkili tasarım çözümleri sunar. Stevens (2005) denge problemleri yaşayan bireylerde kaymaz zemin malzemelerinin düşme riskini anlamlı şekilde azalttığını bildirmektedir.

Ahşap malzemeler psikososyal gereksinimlerle de yüksek uyum göstermektedir. Çeşitli çalışmalar doğal materyallerin sakinleştirici etkisi olduğunu, özellikle ahşabın sıcak rengi ve organik yapısının kullanıcıda pozitif duyuşal tepki yarattığını ortaya koymuştur. Burnard & Kutnar (2015), ahşap iç mekânlarda stres ilişkili fizyolojik göstergelerin (örneğin kortizol düzeyleri) azaldığını bildirmiştir. Ahşap malzeme kullanımının iç ortam kalitesini yükselttiğini ve kullanıcılarda olumlu duygular uyandırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca ahşabın nem kontrolü, bakteriyel denge ve psikolojik olumlu etkiler gibi fizyolojik avantajları da vurgulanmıştır (Üçüncü, Acar & Barışık, 2025). Ayrıca nostaljik çağrışımlar uyandıran doğal malzemeler, ileri yaşlarda kimlik ve devamlılık duygusunu güçlendirmekte, bilişsel iyilik hâlini desteklemektedir.

Sosyal bağlantılar da yaşlı bireylerin yaşam kalitesinin önemli bir parçasıdır. Estetik açıdan çekici, sıcak ve doğal

malzemelerden üretilmiş mobilyalar yaşlı yetişkinlerin misafir ağırlamaya yönelik motivasyonunu artırarak sosyal katılımı teşvik edebilir. Bhatta & ark. (2017), doğal malzemelerin sosyal kabulü ve kullanıcı-çevre bütünleşmesini desteklediğini, özellikle ahşap yüzeylerin aidiyet hissi oluşturduğunu belirtmiştir.

Orman Ürünlerinde Tasarım Süreci ve Kuramsal Yaklaşımlar

Yaşlı dostu ürün tasarımı, yalnızca estetik bir tercih veya ergonomik bir düzenleme meselesi olmayıp, çok disiplinli bir araştırma ve uygulama sürecini gerektiren sistematik bir yaklaşımdır. Orman ürünleri endüstrisi açısından bu süreç, malzemenin doğal özelliklerinin insan davranışları ve yaşlanmanın getirdiği işlevsel değişikliklerle uyumlaştırılmasını zorunlu kılar.

Yaşlı tüketicilere yönelik tasarımın başlangıç noktası, bireyin fonksiyonel kapasitesinin yaşlanma ile birlikte heterojen biçimde değiştiği gerçeğidir. Yaşlı dostu tasarım erişilebilirlik, kullanılabilirlik ve duygusal konfor olmak üzere üç ana ilkeye dayanır. Tasarım bilimleri literatüründe, yaşlanmaya bağlı fonksiyon kayıplarını çevresel düzenleme ile dengeleyen “kompansatuar tasarım yaklaşımı” öne çıkmaktadır (Nordeström & ark., 2025).

Ron Mace tarafından 1990’larda geliştirilen (Mace, 1998) Evrensel tasarım ilkeleri, günümüzde özellikle demografik yaşlanma, kronik hastalıkların artışı ve bağımsız yaşam beklentisinin yükselmesi nedeniyle daha da önem kazanmıştır (Persson & ark., 2015). Yedi temel evrensel tasarım ilkesi — eşit kullanım, kullanımda esneklik, basit ve sezgisel kullanım, algılanabilir bilgi, hataya tolerans, düşük fiziksel çaba ve uygun boyut-mekân ilişkisi — yaşlı dostu ürünlerin tasarımında doğrudan karşılık bulmaktadır (Steinfeld & Maisel, 2020). Orman ürünleri sektörü açısından evrensel tasarımın uyarlanması önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ahşap mobilyaların biçimlendirilebilirliği, modülerliği ve kişiselleştirilebilir yapısı, farklı fiziksel kapasitelerdeki kullanıcı

gruplarına uyarlanabilen ürünlerin tasarlanmasını mümkün kılmaktadır (Jonsson & ark., 2012; Yang & Vezzoli, 2024).

Kullanıcı merkezli tasarım yaklaşımı, ürün geliştirme sürecinin tüm aşamalarının kullanıcıların ihtiyaçları, fiziksel kapasiteleri ve davranış biçimleri doğrultusunda yapılandırılmasını esas almaktadır (Sanders & Stappers, 2018). Yaşlı bireyler için ürün tasarlarırken bu yaklaşım özellikle önemlidir; çünkü yaşlanma süreci bireyler arasında önemli farklılıklar göstermekte ve yaşlı kullanıcı grubu homojen bir yapı sergilememektedir (Wahl & Gerstorf, 2020). Bu bağlamda kullanıcıların fiziksel, bilişsel ve psikososyal özelliklerinin tasarım sürecine doğrudan yansıtılması, ürünlerin kullanılabilirliği ve kabul edilebilirliği açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (Fisk & ark., 2020). Son yıllarda geronteknoloji alanındaki çalışmalar, yaşlı bireylerin ürün tasarımı süreçlerine aktif katılımının tasarım çıktılarının işlevselliğini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Tasarım sürecine yaşlıların aktif katıldığı ürünlerde ürün kabul oranı %40'a kadar artmış ve uzun süreli kullanım isteği %33 daha yüksek bulunmuştur (Jonsson, 2013).

Son yıllarda biyofilik tasarım anlayışı, doğadan ilham alan materyallerin psikolojik iyilik hâlini artırmadaki rolünü vurgulamaktadır. Ahşap bu yaklaşımın merkezinde yer almaktadır. Biyofilik (doğal öğelerle zenginleştirilmiş) ortamlar, kaygı ve yorgunluk düzeylerini azaltıp dikkat ve canlılığı artırmaktadır. Nöral ölçümlerde, biyofilik ortamlarda kortikal oksijenlenmenin daha dengeli olduğu ve psikolojik iyilik hâlinin yükseldiği gösterilmiştir (Youn, Kang & Lee, 2025).

Orman ürünleri endüstrisinde son yıllarda geliştirilen teknoloji ve inovasyon uygulamaları, yaşlı dostu ürün tasarımına önemli katkılar sağlamaktadır. Özellikle dijital üretim teknolojileri, sensör entegrasyonu, malzeme modifikasyonu ve sürdürülebilir mühendislik uygulamaları bu sürecin temel bileşenleridir. 3D

modelleme ve parametrik tasarım araçları, tasarım sürecini optimize ederek yaşlı tüketici ihtiyaçlarına hızlı cevap verebilen prototiplerin geliştirilmesini mümkün kılar. Akıllı mobilya uygulamalarında kullanılan gömülü sensörler, düşme riskini erken algılayabilir, oturma pozisyonunu analiz edebilir veya ergonomik olmayan kullanım örüntülerini tespit ederek kullanıcı güvenliğini artırabilir (Zhou & ark., 2022).

Ürün Kategorileri

Yaşlı bireylerin gündelik yaşam aktiviteleri, fiziksel, duyuşsal ve bilişsel fonksiyonlardaki yaşa bağılı değışimlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle yaşlı dostu ürünlerin tasarımında hem ergonomik gereksinimlere hem de psikososyal ihtiyaçlara cevap verebilen bütüncül yaklaşımlar gereklidir.

Oturma, yaşlı bireyler için günlük yaşam aktivitelerinde sıkça gereksinim duyulan bir fonksiyondur ve yaşlanmayla birlikte denge kaybı, kas gücü azalması ve eklem hareketliliğinde gerileme nedeniyle oturma-kalkma geçişlerinde düşme riski önemli ölçüde artar. Oturma yüzeyinin yüksekliğı, diz popliteal yüksekliğı gibi antropometrik değerlere göre ayarlanmalıdır (Özkaya, Başıbüyük & Dizel, 2024). Yaşlı yetişkinlerde optimum konfor ve basınç dağılımı sağlamak için koltuk yüksekliğinin kişinin diz popliteal yüksekliğine yakın olması tavsiye edilmiştir; ayrıca sırt dayanağının yaklaşık 105° gibi orta açılarda olması daha yüksek konforla ilişkilendirilmiştir (Lyu & ark., 2025). Ayrıca düşme riskinin azaltılması için mobilya köşelerinin keskin olmaması, yüzeylerin mat vernikle kaplanması ve kaymaz sandalyelerin tercih edilmesi gerekmektedir (Fisk & ark., 2020). Oturma yüksekliğı 45-48 cm aralığında olan ahşap mobilyalarda diz ve kalça zorlanması %29, kolçak eklenen ürünlerde düşme riski algısı %34 azalmıştır (Fu & ark., 2025).

Yatak odası ürünleri yaşlı bireylerin bağımsızlık algısını belirleyen en önemli mekân bileşenleri arasındadır. Deneyisel çalışmalar, yaşlı bireylerin yataktan kalkma sırasında diğer mekânlarda olduğundan daha yüksek düşme riski taşıdığını göstermektedir (Lord, Sherrington, & Naganathan, 2021). Yatak yüzey yüksekliğinin 450–550 mm aralığında olması, diz ve kalça eklemlerindeki hareket kısıtlılıklarını telafi ederek kalkmayı kolaylaştırmaktadır. Ayarlanabilir yatak çerçeveleri ve başlık açısı değiştirebilen mekanizmalar hem mobilite kısıtlılığı olan bireyler için hem de bakım gerektiren durumlarda ergonomik avantaj sağlar. Ahşap çerçeveler, gerek doğal lif dayanımı gerek titreşim sönümleme kapasitesi ile daha sessiz ve kararlı bir yatış deneyimi sunar. Mühendislik ahşap türleri, yatak çerçevelerinde daha yüksek dayanım ve daha uzun ömür sağlayarak yapısal stabiliteyi artırmaktadır (Pheasant & Haslegrave, 2018; Fu, Liu & Hu, 2025). Yatak odası mobilyalarında depolama alanları için kulp tasarımı özel bir önem taşır. Kavrama gücündeki yaşlanmaya bağlı düşüş dikkate alındığında kulpların geniş yüzeyli, kontrast renkli ve yumuşak kenarlı olması gerekmektedir. Ahşap kulpların 3D biçimlendirilebilirliği bu gereksinimi karşılamayı kolaylaştırır. Ayrıca komodin ve dolapların sivri köşelerden arındırılmış olması, yaşlı kullanıcıların gece hareketlerinde çarpma riskini azaltır (Fisk & ark., 2020; Steinfeld & Maisel, 2020).

Ahşap zeminler, elastik yapıları sayesinde düşme şiddetini azaltabilen bir yüzey sunar. Araştırmalar elastik zeminlerin yaşlı bireylerde kalça kırığı riskini anlamlı ölçüde düşürdüğünü göstermektedir (Lachance & ark., 2017). Kaymazlık gereksinimi doğrultusunda ahşap zeminlerde mat UV vernikler, mikro-doku yüzey işlemleri ve kaymaz katkılı kaplamalar kullanılmalıdır.

Merdiven tasarımı yaşlı tüketiciler için yüksek risk içerdiğinden adım genişliği, basamak yüksekliği ve tırabzan formu uluslararası standartlarla uyumlu olmalıdır. Basamak yüksekliğinin

15–18 cm aralığında olması yaşlı yetişkinler için optimum aralık olarak önerilmektedir. Ahşap merdiven basamaklarının yüzey dokusunun kaymazlık sağlayacak şekilde tasarlanması ve basamak kenarlarında kontrast bant uygulanması mekân güvenliğini artırır (Pheasant & Haslegrave, 2018; Kim & ark., 2023).

Yaşlı bireylerde kullanılan rehabilitasyon ürünleri arasında denge tahtaları, el-göz koordinasyonu panoları, kavrama egzersizi çubukları ve dokunsal terapi blokları yer almaktadır. Ahşap malzemenin işlenebilirliği sayesinde geniş yüzey dokuları, farklı direnç seviyeleri ve değişken ergonomik formlar üretmek mümkündür. Örneğin kavrama egzersizi çubuklarının farklı çaplarda üretilmesi, osteoartrit veya kas zayıflığı olan bireyler için fonksiyonel egzersiz çeşitliliği sağlar. Nostaljik ahşap oyuncaklar ve ritmik müzik aletleri (örneğin tahta ritim çubukları) yaşlı bireylerde bilişsel stimülasyon ve anımsama süreçlerini güçlendiren etkiler göstermektedir. Bu tür ürünler, özellikle demans ve hafif bilişsel bozukluk yaşayan bireylerde hem duygusal hem bilişsel destek sunan terapötik araçlar olarak değerlendirilmektedir. Sekiz haftalık wooden toy (ahşap oyun) eğitimi programı uygulanan hafif bilişsel bozukluğu olan yaşlılarda bilişsel ölçümlerde 3.18 puanlık artış ve depresyon puanlarında da anlamlı azalma raporlanmıştır (Cheng & ark., 2024).

Son yıllarda modüler yapı sistemleri, yaşlı nüfusa yönelik konut tasarımında önemli bir çözüm alanı hâline gelmiştir. Cross-Laminated Timber (CLT) ve benzeri mühendislik ahşap teknolojilerinin gelişmesi, hızlı üretilabilen, hafif, yüksek izolasyonlu, deprem dayanımlı ve enerji verimli yaşam birimlerinin tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Yaşlı bireyler için tasarlanan modüler yaşam birimlerinde erişilebilirlik, düşük eşik kullanımı, tek kat planlama ve görsel kontrast gibi evrensel tasarım ilkeleri önceliklidir (Steinfeld & Maisel, 2020; Persson & ark., 2015). Bu tasarım yaklaşımları, yaşlı bireylerin bağımsız yaşamlarını

sürdürmelerini desteklerken düşme riskini azaltmakta ve mekânsal algıyı güçlendirmektedir (Nordeström & ark., 2025).

Sonuç

Küresel demografik dönüşüm, orman ürünleri endüstrisini geleneksel üretim modellerinden, yaşlı tüketicilerin karmaşık ve çok boyutlu gereksinimlerine duyarlı, teknoloji odaklı bir yaklaşıma geçmeye zorunlu kılmaktadır. Yaşlı nüfusun 2050 yılına kadar 1,6 milyara ulaşacağı öngörüldürken, bu segmentin yaşam kalitesini ve güvenliğini destekleyen ürün ekosistemlerinin geliştirilmesi stratejik bir gereklilik haline gelmiştir. Ahşap, doğası gereği sunduğu sıcaklık hissi, düşük ısıl iletkenlik, akustik düzenleme kapasitesi ve biyofilik etkiler gibi bir dizi avantaj sayesinde, yaşlıların konut içi güvenliği, ergonomik gereksinimleri ve psikososyal iyilik hali açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Bu avantajlar, ahşabın bilişsel stresi azalttığı ve çevresel memnuniyeti artırdığı yönündeki bilimsel bulgularla desteklenmektedir. Tasarım sürecinde benimsenen Evrensel Tasarım ve Kullanıcı Merkezli Tasarım yaklaşımları, ürünlerin erişilebilirlik, kullanılabilirlik ve duygusal konfor ilkelerine uygun olmasını sağlamaktadır. Son yıllardaki teknolojik gelişmeler, Endüstri 4.0 uygulamaları ve sensör entegrasyonu ile akıllı mobilyaların ortaya çıkmasına olanak tanımış, böylece mobilyalar kullanıcı güvenliğini artıran fonksiyonel araçlara dönüşmüştür. Sonuç olarak, orman ürünleri endüstrisi, malzeme inovasyonlarını (örneğin CLT) ve dijital üretim teknolojilerini kullanarak, yalnızca işlevsel değil, aynı zamanda estetik, sürdürülebilir ve psikolojik konforu destekleyen, kişiye özel yaşlı dostu konut çözümleri geliştirmede kilit bir konuma gelmiştir.

Kaynakça

Bhatta, S. R., Tiippana, K., Vahtikari, K., Hughes, M. & Kyt  , M. (2017). Sensory and emotional perception of wooden surfaces through fingertip touch. *Frontiers in Psychology*, 8, 367.

Burnard, M. D. & Kutnar, A. (2015). Wood and human stress in the built indoor environment: a review. *Wood Science and Technology*, 49 (5), 969-986.

B  ker, M. B.,   avk  n, R. & B  ker, N. (2023). Ya  lı kullanıcı g  z  yle konut i   mekan g  venli  i. *Ya  lı Sorunları Ara  tırma Dergisi*, 16 (1), 1-8.

Cheng, Q., Wang, H., Cui, M., Wang, Q. & Li, L. (2024). Efficacy of wooden toy training in alleviating cognitive decline in elderly individuals with cognitive impairment: A cluster randomized controlled study. *Plos One*, 19 (10), e0309685.

Dodds, R. M., Granic, A., Davies, K., Kirkwood, T. B., Jagger, C. & Sayer, A. A. (2017). Prevalence and incidence of sarcopenia in the very old: findings from the Newcastle 85+ Study. *Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle*, 8 (2), 229-237.

Dupont, J. (2018). Revised sarcopenia consensus: are we missing the preclinical stage? Online comment on. *Age and Ageing*, 48 (1), 1-1.

Fell, D. R. (2010). *Wood in the human environment: restorative properties of wood in the built indoor environment*. (Doctoral dissertation, University of British Columbia).

Fisk, A. D., Czaja, S. J., Rogers, W. A., Charness, N. & Sharit, J. (2020). *Designing for older adults: Principles and creative human factors approaches*. CRC press.

Fu, W., Liu, Y. & Hu, W. (2025). Characterizing sit-to-stand transition of the elderly considering the effects of seat height and

inclination. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/10255842.2025.2574541>

Fu, X., Wang, X., Xu, B., Feng, M. & Liu, X. (2025). Elderly-Oriented intelligent wooden sofas: mapping mental models to furniture design. *BioResources*, 20 (4).

Hunter, D. J. & Bierma-Zeinstra, S. (2019). Osteoarthritis. *The Lancet*, 393 (10182), 1745-1759.

Ikei, H., Song, C. & Miyazaki, Y. (2017). Physiological effects of wood on humans: A review. *Journal of Wood Science*, 63 (1), 1-23.

Jonsson, O. (2013). *Furniture for Later Life: Design Based on Older People's Experiences of Furniture in Three Housing Forms*. Department of Design Sciences, Faculty of Engineering, Lund University.

Jonsson, O., Sperling, L., Östlund, B. & Hornyánszky, E. D. (2012). User requirements of furniture influenced by a move to a senior housing. *FormAkademisk*, 5 (1). <https://doi.org/10.7577/formakademisk.375>

Kırklıkçı, A. B. & Gültekin, Y. S. (2023). *Orman endüstrisinde sürdürülebilirlik: geçmiş, şimdi ve gelecek perspektifi*. Prof. Dr. Emine Küçüker, Prof. Dr. Koray Özrenk (Eds.), Ziraat, Orman Ve Su Ürünleri Alanında Uluslararası Teori, Araştırma ve Derlemeler içinde (51-65). Ankara: Serüven Yayınevi.

Kırklıkçı, A. B. (2023). *Sürdürülebilir kalkınma ve biyoekonomi kapsamında orman ürünleri sektöründe yeşil yaklaşımlar*. Prof. Dr. Ali Musa Bozdoğan, Prof. Dr. Nigar Yarpuz Bozdoğan (Eds.), Ziraat, Orman ve Su Ürünleri Alanında Akademik Araştırma ve Derlemeler içinde (557-565), Ankara: Platanus Publishing.

Kim, K., Steinfeld, E. & Weidemann, S. (2023). The effects of interactive stairways on user behaviour and safety. *Architectural Science Review*, 66 (4), 322-329.

Kuttruff, H. & Vorländer, M. (2024). *Room acoustics*. Crc Press.

Kwak, S. & Choi, K. (2025). Visual perceptions of wood-integrated material combinations: effects on psychological and physiological responses. *Journal of Wood Science*, 71 (1), 20.

Lachance, C. C., Jurkowski, M. P., Dymarz, A. C., Robinovitch, S. N., Feldman, F., Laing, A. C. & Mackey, D. C. (2017). Compliant flooring to prevent fall-related injuries in older adults: A scoping review of biomechanical efficacy, clinical effectiveness, cost-effectiveness, and workplace safety. *PLoS One*, 12 (2), e0171652.

Lawton, M. P. & Nahemow, L. (1973). Ecology and the aging process. In C. Eisdorfer & M. P. Lawton (Eds.), *The Psychology of Adult Development and Aging* (pp. 619-674). American Psychological Association.

Lord, S. R., Sherrington, C. & Naganathan, V. (Eds.). (2021). *Falls in Older People*. Cambridge University Press.

Lyu, J., Chen, S., Xia, S., Zhong, Q., Chang, D., Lin, Y., Wang, H. & Chen, M. (2025). Effects of seat height and backrest inclination on body pressure distribution and subjective comfort in seat design for the elderly. *Applied Sciences*, 15 (20), 11224. <https://doi.org/10.3390/app152011224>

Mace, R. L. (1998). Universal design in housing. *Assistive Technology*, 10 (1), 21-28.

Nordeström, F., Slaug, B., Zingmark, M., Granbom, M. & Iwarsson, S. (2025). Relationship between active aging and

perceived aspects of home among persons aged 55+ listed with an interest in relocation. *Sage Open Aging*, 11, 30495334251366584.

Nyrud, A. Q. & Bringslimark, T. (2010). Is interior wood use psychologically beneficial? A review of psychological responses toward wood. *Wood and Fiber Science*, 42, 202-218.

Oswald, F. & Wahl, H. W. (2005). Dimensions of the meaning of home. In Rowles, G.D. & Chaudhury, H., (Eds.), *Home and Identity in Late Life: International Perspectives* (pp. 21-45). Springer, New York,

Owsley, C. (2011). Aging and vision. *Vision Research*, 51 (13), 1610–1622. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.10.020>

Özkaya, K., Başibüyük, G. Ö. & Dizel, T. (2024). Türkiye’de yaşlı bireylerin beden ölçülerine uygun oturma elemanı tasarımı. *Ergonomi*, 7 (1), 26-36.

Persson, H., Åhman, H., Yngling, A. A. & Gulliksen, J. (2015). Universal design, inclusive design, accessible design, design for all: different concepts—one goal? On the concept of accessibility—historical, methodological and philosophical aspects. *Universal Access in the Information Society*, 14 (4), 505-526.

Pheasant, S. & Haslegrave, C. M. (2018). *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work* (3rd ed.). CRC Press.

Probst, F., Ratcliffe, J., Molteni, E., Mexia, N., Rees, J., Matcham, F., Antonelli, M., Anthea Tinker, A., Shi, Y., Ourselin, S. & Liu, W. (2024). A scoping review on human-centered design approaches and considerations in the design of technologies for loneliness and social isolation in older adults. *Design Science*, 10, e39.

Ramos-Maldonado, M. & Aguilera-Carrasco, C. (2021). *Trends and opportunities of Industry 4.0 in wood manufacturing* --204--

processes. In *Engineered Wood Products for Construction*. IntechOpen.

Rosenberg, D. E., Huang, D. L., Simonovich, S. D. & Belza, B. (2013). Outdoor built environment barriers and facilitators to activity among midlife and older adults. *The Gerontologist*, 53 (2), 268-279.

Sanders, E. B. N. & Stappers, P. J. (2018). Co-creation and the new landscapes of design. *CoDesign*, 14 (2), 85-104.

Schaie, K. W. (2024). *Aging and human performance*. In *The aging dimension* (pp. 29-38). Routledge.

Steinfeld, E. & Maisel, J. (2020). *Universal Design: Creating Inclusive Environments (2nd ed.)*. Wiley.

Stevens, J. A. (2005). Falls among older adults—risk factors and prevention strategies. *Journal of Safety Research*, 36 (4), 409-411.

United Nations (UN). (2023). *World population ageing 2023*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs.

Üçüncü, K., Acar, H. H. & Barışık, T. (2025). Ergonomik iç mekan tasarımında kullanılan ahşap malzemelerin ortam kalitesine ve insan refahına etkileri. *Journal of PAN Sciences*, 1 (1), 17-30.

Wahl, H. W. & Gerstorf, D. (2020). Person–environment resources for aging well: Environmental docility and life space as conceptual pillars for future contextual gerontology. *The Gerontologist*, 60 (3), 368-375.

Wang, Y. C., Bohannon, R. W., Li, X., Sindhu, B. & Kapellusch, J. (2018). Hand-grip strength: normative reference values and equations for individuals 18 to 85 years of age residing in the United States. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 48 (9), 685-693.

World Health Organization (WHO). (2015). *World report on ageing and health*. World Health Organization Press.

World Health Organization (WHO). (2021). *A global report on falls prevention in older age*. World Health Organization Press.

Yan, D. & Guo, Q. (2023). Effect of indoor wall wood coverage on the elderly group—a case study of activity rooms in old-age buildings. *Buildings*, 13 (8), 2086.

Yang, D. & Vezzoli, C. (2024). Designing environmentally sustainable furniture products: Furniture-specific life cycle design guidelines and a toolkit to promote environmental performance. *Sustainability*, 16 (7), 2628.

Youn, C. Kang, M., & Lee, J. (2025). Biophilic Design and Restorative Effects: A Neuropsychological Study of Healthy Indoor Workspaces in Urban Contexts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22 (10), 1571.

Zhou, C. Huang, T., Luo, X., Kaner, J., & Fu, X. (2022). Recognition and analysis of an age-friendly intelligent sofa design based on skeletal key-points. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (18), 11522.

BÖLÜM 10

POLİSTİREN KOMPOZİT KONTRPLAKLARIN BOYUTSAL KARARLILIK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

1. ABDULLAH UĞUR BİRİNCİ¹

2. HASAN ÖZTÜRK²

3. AYDIN DEMİR³

Giriş

Masif ahşabın heterojen yapısı, boyutsal kararsızlığı ve büyük boyutlu elemanlarda kalite sürekliliğinin sağlanmasındaki güçlükler, ahşap esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu doğrultuda geliştirilen ahşap kompozitler; üretim süreçlerinde kullanılan hammaddelerin türü, miktarı, tabaka organizasyonu ve işlem parametrelerinin değiştirilmesiyle farklı kullanım amaçlarına uygun özelliklerde üretilebilmekte ve bu nedenle kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Özellikle yapı

¹ Arş. Gör. Dr, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-3273-3615

² Doç. Dr, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Ormancılık Bölümü
Orcid: 0000-0002-5422-7556

³ Doç. Dr, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü,
Orcid: 0000-0003-4060-2578

ve mobilya sektörlerinde, geniş açıklıkların geçilmesini gerektiren uygulamalarda masif ahşap her zaman istenilen ölçü ve kaliteyi sağlayamamakta; bu durum kontrplak gibi mühendislik ürünü ahşap kompozitleri ön plana çıkarmaktadır.

Kontrplak, lif yönleri birbirine dik olarak yerleştirilmiş kaplama tabakalarından oluşan yapısı sayesinde, masif ahşaba kıyasla daha homojen mekanik özellikler ve daha yüksek boyutsal kararlılık sunmaktadır (Aydın & Çolakoğlu, 2008; Demirkır vd., 2013). Ancak kontrplak üretiminde yaygın olarak kullanılan üre formaldehit (ÜF), fenol formaldehit (PF) ve melamin üre formaldehit (MÜF) esaslı sentetik reçineler, formaldehit emisyonu nedeniyle uzun yıllardır insan sağlığı ve çevre açısından tartışma konusu olmuştur (Çolakoğlu & Örs, 1999; Sundman vd., 2007). Formaldehitin göz yaşarması, solunum güçlüğü ve alerjik reaksiyonlar gibi sağlık sorunlarına yol açtığı; ayrıca kanserojen etkisinin bulunduğu çeşitli çalışmalarla ortaya konulmuştur (Tang vd., 2011; Gangi vd., 2013). Uluslararası Kanser Araştırma Merkezi (IARC) tarafından formaldehitin insanlar için kanserojen olarak sınıflandırılması, bu konunun önemini daha da artırmıştır (IARC, 2006).

Bu gelişmeler doğrultusunda, ahşap esaslı levha endüstrisinde formaldehit emisyonunu azaltmaya veya tamamen ortadan kaldırmaya yönelik çok sayıda araştırma yürütülmüştür. Bu kapsamda, reçine içeriğindeki formaldehit/üre mol oranının düşürülmesi (Myers, 1984), tutkalların çeşitli kimyasallarla modifiye edilmesi (Zhu vd., 2014), formaldehit tutucuların kullanılması (Kim, 2009; Costa vd., 2013), doğal kökenli tutkalların değerlendirilmesi (Lei vd., 2014) ve farklı katalizör sistemlerinin uygulanması gibi yöntemler önerilmiştir (Kishi vd., 2006; Liu & Li, 2007; Huang & Li, 2008; Deng vd., 2014). Ancak literatürde önerilen bu yöntemlerin büyük bir kısmı ya maliyet artışı ya da levhaların teknolojik özelliklerinde meydana gelen olumsuzluklar

nedeniyle endüstriyel ölçekte yaygın bir uygulama alanı bulamamıştır (Fang vd., 2013; Colak vd., 2016).

Bu bağlamda polistren esaslı strafor malzemeler, formaldehit içermemeleri ve yüksek yalıtım özellikleri sayesinde ahşap esaslı kompozitlerde alternatif bir bağlayıcı olarak dikkat çekmektedir. Genleştirilmiş polistren (EPS) ve ekstrüde polistren (XPS), yapı, ambalaj ve otomotiv sektörlerinde yaygın biçimde kullanılmakta; ancak biyolojik olarak zor bozunmaları nedeniyle ciddi bir çevresel atık problemi oluşturmaktadır (Hu vd., 2005). Bu atıkların ahşap kompozit üretiminde değerlendirilmesi hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik geri kazanım açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Nitekim literatürde, polistren atıklarının kontrplak üretiminde sentetik reçineler yerine bağlayıcı veya ara tabaka malzemesi olarak kullanılabileceği ve bu sayede formaldehit emisyonunun tamamen ortadan kaldırılabilceği gösterilmiştir (Demirkır vd., 2013; Hu vd., 2005).

Ahşap esaslı levhaların kullanım performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri, neme ve suya karşı gösterdikleri davranıştır. Odunun higroskopik yapısı nedeniyle su ile temas halinde su alma ve buna bağlı olarak kalınlığına şişme meydana gelmekte; bu durum levhanın boyutsal kararlılığını ve servis ömrünü doğrudan etkilemektedir. Su alma olayının özellikle ilk iki saat içinde hızlı bir şekilde gerçekleştiği, bu aşamada toplam su alımının büyük bir kısmının difüzyon yoluyla oluştuğu; daha sonraki süreçte ise su alım hızının azaldığı bilinmektedir (Chiang vd., 2014). Bu nedenle, ahşap esaslı levhaların boyutsal stabilitesinin değerlendirilmesinde 2 ve 24 saatlik suya daldırma testleri yaygın olarak kullanılmaktadır (TS EN 317, 1999).

Bu çalışmada, kontrplakların boyutsal stabilite davranışını etkileyen üretim parametrelerinden biri olarak kaplama kurutma tipi de ele alınmış; bu kapsamda doğal kurutma ve teknik kurutma uygulanmış kaplamalar kullanılmıştır. Kontrplak üretiminde

kaplama kurutma işlemi hem levha performansını hem de üretim sürecinin enerji tüketimini doğrudan etkileyen önemli bir aşamadır. Literatürde, kontrplak üretiminde kullanılan toplam termal enerjinin yaklaşık %70'inin kaplama kurutma işleminde tüketildiği, bunun da fabrikanın toplam enerji ihtiyacının yaklaşık %60'ına karşılık geldiği bildirilmektedir (Baldwin, 1995; Aydın & Çolakoğlu, 2005; Demirkır vd., 2013). Bu durum, kaplama kurutma yöntemlerinin hem teknik hem de ekonomik açıdan sorgulanmasını gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda, doğal kurutma uygulanmış kaplamalar ile teknik kurutma uygulanmış kaplamaların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi; boyutsal stabilite açısından yeterli performansın daha düşük enerji girdisiyle sağlanıp sağlanamayacağının ortaya konulması açısından önem taşımaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada kaplama kurutma tipi, bağlayıcı/ara tabaka türü ve presleme parametreleri ile birlikte ele alınan temel değişkenlerden biri olarak değerlendirilmiştir.

Bu kitap bölümünde, kayın (*Fagus orientalis* Lipsky) kaplamalardan üretilmiş üç tabakalı kontrplak levhalarda, geleneksel bağlayıcı olarak kullanılan Üre Formaldehit (ÜF) yerine alternatif bağlayıcı olarak değerlendirilen altı farklı strafor türünün (beş farklı yoğunlukta genişletilmiş polistren-EPS ve bir ekstrüde polistren-XPS) 2 ve 24 saatlik suya daldırma süreleri sonunda kalınlığına şişme ve su alma davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. ÜF ile üretilmiş geleneksel kontrplak levhalar, çalışmada kontrol grubu olarak değerlendirilmiştir.

Sunulan araştırma kapsamında, bu kitap bölümünde özellikle kayın kaplamalı sistemlerin su ile etkileşim davranışı ele alınmaktadır. Deneysel tasarım kapsamında, bağlayıcı türüne ek olarak pres sıcaklığı ve pres süresinin boyutsal stabilite üzerindeki etkileri de dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, kontrol grubu levhalar 110 °C pres sıcaklığında ve 6 dakika pres süresinde, strafor esaslı

kompozit kontrplak levhalar ise 130 °C, 140 °C ve 150 °C pres sıcaklıklarında ve 6, 8 ve 10 dakika pres sürelerinde üretilmiştir.

Bu yaklaşım ile; kayın kaplamalardan üretilmiş üç tabakalı kontrplak levhalarda, bağlayıcı türü ve yoğunluğu ile presleme parametrelerinin yanı sıra kurutma tipi dikkate alınarak, su alma ve kalınlığına şişme davranışındaki farklılıkların nicel olarak ortaya konulması amaçlanmaktadır.

Materyal ve Yöntem

Ağaç Malzeme

Çalışmada yapraklı ağaç türlerinden olan Doğu Kayını (*Fagus orientalis* Lipsky) soymalık tomrukları kullanılmıştır. Tomruklar Akkuş/Ordu bölgesinden temin edilmiştir. Soyma kaplama üretiminde kullanılmak üzere seçilen tomrukların; en az 35 cm çapında, silindirik formda, lif yapısı düzgün, budak, çürük ve renk bozukluğu içermeyen, reaksiyon odunu ihtiva etmeyen özelliklere sahip olmasına özen gösterilmiştir.

Fagaceae familyası türlerinde olan Doğu Kayını 30-40 m boy ve 100-150 cm kadar çapa ulaşabilmektedir. Odunu kırmızımsı beyaz renktedir. Olgun odun özelliklerine sahiptir. 80 yaşın üzerindeki ağaçlarda kırmızımsı kahverenginde düzenli olmayan, iç kısımda dalgalı şeritli ve kırmızı yürek oluşumu adı verilen bir öz odun mevcuttur. Dağınık trahelidir. Yıllık halka sınırları, koyu renkli yaz odununda trahelerin az sayıda olması ile belirgindir. Traheler küçük çaplıdır. Geniş öz ışınları çıplak gözle dahi görülebilmektedir ve 0,5-0,1 mm aralıklıdır. Yıllık halka sınırlarında kalın öz ışınları genişlemektedir. Radyal yüzeylerde koyu renkli geniş aynacıklar, teğet kesitte kırmızımsı iç şeklinde lekeler halindedir. Sert ve ağır bir odunu vardır. Çatlamaya ve dönüklüğe eğilimi dolayısıyla dikkatli kurutulur. İşlenmesi kolaydır. Soyulabilir, kesilebilir, yapıştırma ve yüzey işlemlerinde güçlük yoktur. İyi boya ve vernik kabul eder. Böcek ve mantarlara karşı çok hassas olup dayanıksızdır.

Çabuk ardaklanır. Diri odunu iyi emprenye edilirken öz odunu emprenye edilmez.

Geniş bir kullanım alanına sahiptir. Masif mobilya, bükme mobilya, spor aletleri ve alet sapları yapımında, tornacılıkta, kontrplak, kaplama levhası ve parke üretiminde, fiçı sanayiinde, karoser yapımında, lif, yonga ve kağıtlık odun olarak kullanılmaktadır. Emprenye edildiği takdirde travers yapımında da kullanılır. Ayrıca odun kömürü yapımında da değerlendirilmektedir (Bozkurt, 1992).

Polistren

Polistren kullanım amacı ve yerine göre çeşitli boyut ve yoğunluklarda üretilebilmektedir. Daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar irdelendiğinde kullanılan polistrenin türü ve yoğunluğunun üretilen kompozit levhanın mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği belirlenmiştir (Demirkır vd., 2013; Shalbafan, 2013). Bu nedenle çalışmada piyasada yaygın kullanıma sahip, 10 mm kalınlığında 5 farklı yoğunlukta EPS (Genleştirilmiş Polistren) ve 10 mm kalınlığında 1 adet XPS (Ekstrude Polistren) olmak üzere toplamda 6 farklı yoğunlukta polistren kullanılmıştır. Böylelikle arzu edilen özelliklere sahip ahşap kompozit levha üretimi için en uygun polistren türünün belirlenmesi hedeflenmiştir. EPS petrolden elde edilen, buhar ve pentan gazı ile etkileşime girdiğinde kapalı gözenekli bir yapı alan, tipik olarak beyaz renkli bir ısı yalıtım malzemesi olarak kullanımı yaygınlaşmış bir plastik türevidir (Ertuğrul vd., 2012). Ekstrüde polistren köpük, polistren hammaddesinin ekstrüzyonla levha halinde çekilmesiyle üretilen bir ısı yalıtım malzemesidir. Ekstrüde polistrenin avantajlarının kaynağı üretim teknolojisini oluşturan haddeleme (ekstrüzyon) işlemi ve bunun sonucunda ortaya çıkan kapalı gözenekli hücre yapısıdır (Güç, 2008). Çalışmada kullanılan polistren türleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan polistren türleri

Polistren Türü	Yoğunluk (kg/m3)
EPS-S1	10
EPS-S2	16
EPS-S3	20
EPS-S4	24
EPS-S5	30
XPS	30-32

Tutkal

Bu çalışma kapsamında; kontrplak endüstrisinde yaygın olarak kullanılan tutkal türlerinden biri olan üre formaldehit reçinesi kullanılmıştır. Bu amaçla POLİSAN/Politrade Kimya A.Ş. den üre formaldehit (ÜF) tutkal reçinesi temin edilmiştir. Üre formaldehit (ÜF) reçineleri, dünyada ağaç malzemenin yapıştırılmasında en çok kullanılan yapıştırıcılardır. Amino grubu reçinelerinden olan üre formaldehit, termosetting bir polimer olup üre ile formaldehitin kondenzasyonu sonucu meydana gelmektedir. Formaldehit/Üre mol oranı 1.1:1 den 2.0:1 e kadar değişmektedir. Asidik ortamda sertleşen bir tutkaldır. Reaktif yapısı nedeniyle ÜF reçineleri, en hızlı sertleşen tutkallar arasında yer almaktadır (Aydın, 2004). Çalışmada %55 katı madde oranına sahip ÜF reçinesi kullanılmıştır. Geleneksel kontrplak levhaların üretiminde ÜF tutkal çözeltisinde sertleştirici olarak amonyum klorür'ün %15' lik sulu çözeltisi kullanılmıştır.

Kontrplak Levhalarının Üretimi

Kaplama Üretimi

Çalışma için temin edilen doğu kayını tomruklar 12 saat süre ile buharlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Tomrukların buharlama işlemi bir endüstriyel tesiste gerçekleştirilmiş olup, buharlamadan

alınan tomruklar sıcaklıklarını kaybetmeden soyma ünitesine getirilerek kaplama üretimi gerçekleştirilmiştir. Soyma işlemi öncesinde buharlama işlemi yapılan tomrukların enine kesitlerinde matkap ile delikler açılarak termometre ile tomruk sıcaklıkları ölçülmüş ve yaklaşık 50 °C olarak tespit edildikten sonra soyma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kaplama levhalarının üretimi, KTÜ Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde kurulu bulunan Kontrplak Pilot Tesisi'ndeki kaplama soyma makinesinde yapılmıştır. Bu soyma makinesi, 80 cm uzunluk ve 40 cm çapa kadar soyma yapabilmektedir. Soyma öncesinde, zincirli testere kullanılarak tomruklar 50'şer cm uzunlukta parçalara bölünmüşlerdir. Soyma işleminde soyma makinesi yatay açıklığı kaplama kalınlığının % 85'i kadar, düşey açıklık ise 0.5 mm olarak ayarlanarak 2 mm kalınlıkta ve 50 cm x 50 cm ebatlarında kaplama levhaları üretilmiştir.

Kaplama Kurutma İşlemi

Üretilen kaplama levhaları ebatlandırıldıktan sonra kurutma işlemine alınmışlardır. Kaplama levhalarının kurutma işlemleri, K.T.Ü. Orman Fakültesi Kontrplak Pilot Tesisi'nde gerçekleştirilmiştir. Kaplama kurutma işleminde, endüstriyel koşullarda yaygın olarak kullanılmakta olan 110°C kurutma sıcaklığı uygulanmıştır. Kurutma işlemi tamamlanan kaplamaların rutubetleri elektrikli bir rutubet ölçer ile ölçülmüş ve ortalama % 5-7 civarında rutubete kadar kurutuldukları tespit edilmiştir.

Polistren kompozit kontrplak (PCP) üretimi için kullanılan kaplama levhalarında kurutma işleminin etkisini belirleyebilmek amacıyla bu kaplamaların yarısı oda koşullarında (20°C ve %65 bağıl nem) %12 rutubete ulaştıklarında üretime alınmışlardır. Böylelikle polistren kompozit kontrplak üretiminde yapay bir

kurutmaya ihtiyaç olup olmadığının ortaya koyulması hedeflenmiştir.

Kaplama Levhalarının Tutkallanması

Geleneksel kontrplak levhalarının üretiminde kullanılan tutkal reçetesi, katı madde miktarına göre Tablo 2’de verilmiştir:

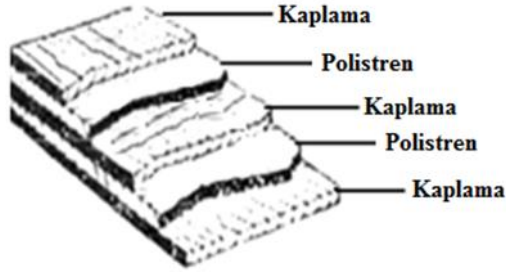
Tablo 2. Deneme levhalarının üretiminde kullanılan üre formaldehit tutkal reçetesi

Tutkal Karışımını Oluşturan Maddeler	Birim Ağırlık
%55’lik ÜF reçinesi	100
Buğday Unu	30
NH ₄ Cl (%15’ lik)	10

Kaplama levhalarının tutkallanmasında 4 silindirli tutkallama makinesi kullanılmıştır. Levhaların tek yüzüne 160 gr/m² tutkal çözeltisi sürülecek şekilde tutkallama yapılmıştır. Tutkal çözeltileri her defasında en fazla 5 kontrplak levhası üretimi için gerekli miktarlarda hazırlanmış, böylece çözeltinin viskozitesinin değişmesi önlenmiştir.

PCP levhalarının üretiminde formaldehit içerikli bir tutkal kullanılmamıştır. Kaplamalar arasına bağlayıcı olarak 50 cm x 50 cm boyularında polistren konularak üretim gerçekleştirilmiştir. PCP levhaların üretim işleminde presleme öncesi taslak hazırlama işlemi Şekil 1’ de gösterilmektedir.

Şekil 1. Üç tabakalı PCP levha taslağı



Kontrplak Levhalarının Preslenmesi

Üç tabakalı kontrplak taslaklarının sıcak preslenmesinde; presleme alanı 70x89 cm olan, elektrikle ısıtılan tek katlı, laboratuvar tipi bir sıcak pres kullanılmıştır. Her bir ağaç türü için, kullanılan bağlayıcı türüne göre levhaların üretilmesi sırasında uygulanan sıcak presleme koşulları Tablo 3’ de verilmiştir.

Tablo 3. Levha üretiminde uygulanacak pres koşulları

Ağaç Türü	Levha Türü	Bağlayıcı Türü	Pres Koşulları		
			Pres Basıncı (kg/cm ²)	Pres Sıcaklığı (°C)	Pres Süresi (dak)
	Kontrplak	ÜF		110	6
		S1			
		S2			
Kayın	PCP	S3	12	130,140,150	6,8,10
		S4			
		S5			
		XPS			

Presleme işleminde farklı süre ve sıcaklıklar uygulanması ile polistren ve kaplama arasındaki bağlanmanın sağlanabileceği optimum pres süresi ve sıcaklığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Seçilen pres sıcaklıkları geleneksel kontrplak üretiminde uygulanan pres sıcaklığı ile literatürde (Borysiuk vd., 2010; Najafi, 2013)

polistren malzemelerin camlaşma sıcaklığı ve erime sıcaklık değerleri (90-240 °C) göz önüne alınarak seçilmiştir.

Presleme işleminden sonra üretilen kontrplakların iç ve dış tabakaları arasındaki sıcaklık ve rutubet farklılığını gidermek amacıyla bu levhalar istif latası kullanmaksızın üst üste istiflenmişlerdir. Bu şekilde üretilen kontrplak levhalarının tedrici olarak soğumaları sağlanarak biçim değiştirmeleri önlenmeye çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında 6 polistren türü, 2 kurutma tekniği, 3 pres sıcaklığı ve 3 pres süresi olmak üzere toplamda 108 adet levha grubu oluşturulmuştur.

Her bir levha grubu için 3 tabakalı ve 50 cm x 50 cm ebatlarında ikişer adet kontrplak levhası üretilmiştir.

İstatistiksel Analiz

Çalışma kapsamındaki polistren kompozit kontrplak levhalarından, XPS ile 130 °C’de üretilen gruplarda gerekli yapışma sağlanamadığından sonuç alınamamıştır. Bundan dolayı, istatistiksel analiz yapılırken bu gruplarda diğer gruplara göre daha az sayıda örnek kullanılmıştır. Kontrplak levhalarında her ağaç türü için; optimum sonuçları veren en iyi polistren türünü, kurutma tipini ve pres parametrelerini ve ayrıca her polistren türü için de optimum sonuçları veren en iyi ağaç türünü, kurutma tipini ve pres parametrelerini belirlemek için çoğul varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi ile elde edilen farkların anlamlı bulunması durumunda, Student Newman-Keuls test uygulanarak varyans kaynaklarının ortalamaları karşılaştırılmış ve homojenlik grupları tespit edilmiştir. İstatistiksel analizlerin gerçekleştirilmesinde, SPSS 16 for Windows istatistik paket programından yararlanılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

2 ve 24 saatte 19-21°C sıcaklıktaki temiz su içerisinde bekletilen örneklerin kalınlık artışı ve su alma değerleri, TS EN 317 (1999)'de belirtilen esaslara uygun olarak tayin edilmiştir. Her test grubundan yirmişer adet test numunesi kullanılmıştır. Bağlayıcı türü, kurutma tipi, pres sıcaklığı ve pres süresinin kayın kontrplak levhaların kalınlık artışı ve su alma değerleri üzerine etkilerini belirlemek amacıyla çoklu varyans analizi yapılmıştır. Varyans kaynakları ortalamalarının karşılaştırılması amacıyla Newman-Keuls testi yapılmıştır.

2 ve 24 Saatte Kalınlık Artışı

Kayın kontrplaklar için yapılan varyans analizi sonuçlarına göre; bağlayıcı türü, kurutma tipi, pres sıcaklığı ve pres süresinin kontrplakların kalınlık artışı değerleri üzerine olan etkileri anlamlı bulunmuş ve ortalamaların karşılaştırılması Tablo 4'te verilmiştir. 2 saat kalınlık artışı değerlerine göre; kayın kontrplaklar için en yüksek kalınlık artışı değerlerini veren bağlayıcı türü S1 olmuştur. En düşük kalınlık artışı değerleri ise ÜF ile üretilen kontrol grubundan sonra S5 de bulunmuştur. 24 saat için ise en yüksek kalınlık artışı değerlerini veren bağlayıcı türü S1 olmuştur. En düşük kalınlık artışı değerleri ise S5 ve XPS de bulunmuştur. Doğal kurutulan kaplamalardan üretilen kontrplakların kalınlık artışı teknik kurutmaya göre daha yüksek bulunmuştur. Pres parametreleri incelendiğinde 2 saat için en yüksek kalınlık artışı değerleri; 130°C pres sıcaklığında ve 6 dk pres süresinde; en düşük değerler ise, 140 ve 150°C pres sıcaklıklarında, 8 ve 10 dk pres sürelerinde elde edilmiştir. 24 saat için ise; en yüksek kalınlık artışı değerleri, 130 ve 150°C pres sıcaklıklarında ve 6 dk pres süresinde; en düşük değerler ise, 140°C pres sıcaklığında ve 8 dk pres süresinde elde edilmiştir.

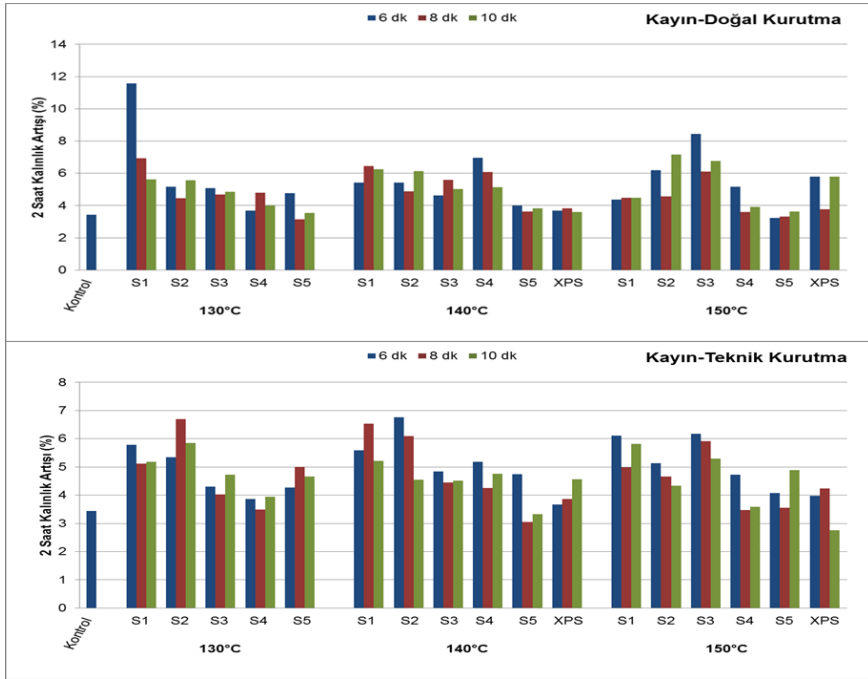
Tablo 4. Kayından üretilmiş kontrplak levhalarının kalınlık artışı değerleri üzerine etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Newman-Keuls testi sonuçları ($p \leq 0,05$)

Varyans Kaynakları		N	Kalınlık Artışı (%)			
			2 saat		24 saat	
Bağlayıcı Türünün Etkisi						
	Kontrol	360	3,44	a	6,93	c
	(ÜF)	360	6,49	g	9,70	f
	S1	360	5,50	f	7,90	d
	S2	360	5,30	e	8,34	e
	S3	360	4,48	d	6,69	b
	S4	360	3,93	b	5,80	a
	S5	240	4,13	c	6,01	a
	XPS					
Kurutma Tipinin Etkisi						
	Doğal	1200	5,02	b	7,88	b
	Teknik	1200	4,55	a	6,93	a
Pres Sıcaklığının Etkisi						
	130°C	720	5,05	b	7,62	b
	140°C	840	4,70	a	7,11	a
	150°C	840	4,65	a	7,51	b
Pres Süresinin Etkisi						
	6 dk	800	5,24	b	7,58	c
	8 dk	800	4,51	a	7,11	a
	10 dk	800	4,60	a	7,35	b

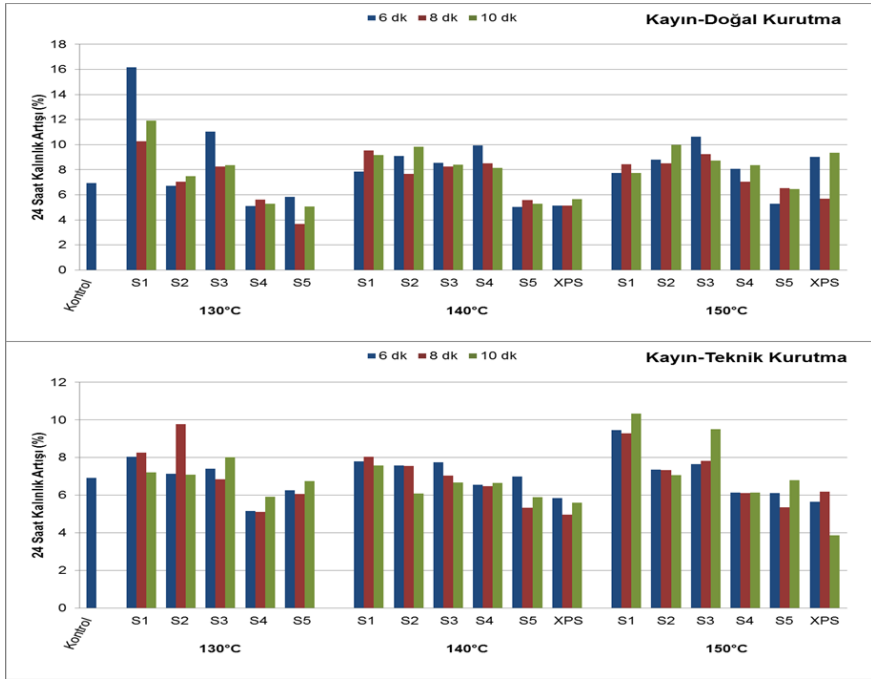
**Farklı harfler istatistiksel olarak belirgin bir fark olduğunu belirtmektedir*

Kayın kaplama levhalarından üretilen kontrplak levhalarının kalınlık artışı değerleri üzerine, kaplama kurutma tipi, bağlayıcı türü, uygulanan pres süresi ve sıcaklığının etkisi Şekil 2 ve 3'te gösterilmiştir.

Şekil 2. Doğal ve teknik kurutma uygulanmış kayın kaplamalardan üretilen kontrplak levhalarının 2 saatte kalınlık artışı test sonuçları



Şekil 3. Doğal ve teknik kurutma uygulanmış kayın kaplamalardan üretilen kontrplak levhalarının 24 saatte kalınlık artışı test sonuçları



Şekil 2 ve 3'te görüldüğü üzere genel olarak strafor yoğunluğunun artması ile kalınlık artışı oranları azalmaktadır. Literatürde bağlayıcı miktarının artması ile levhaların boyutsal stabilitesinin geliştiği ifade edilmiştir (Çolak vd., 2011). Daha önce yapılan çalışmalarda bağlayıcı miktarının kalınlık artışı üzerine pozitif etkisinin olduğu belirlenmiştir (Çolak vd., 2011; Maloney, 1970; Halligan & Schiewind, 1974). Çolak vd. (2011) 0.70 gr/cm³ yoğunluktaki levhaların 0.60 gr/cm³ yoğunluktaki levhalar ile karşılaştırıldıklarında daha yüksek kalınlık artışı değerleri verdiğini belirlemişlerdir. Çalışma kapsamında yoğunluğu yüksek olan straforlar ile üretilen levhalar daha düşük yoğunluğa sahip olduklarından, yoğunluğu düşük straforlar ile üretilen yüksek levha yoğunluğuna sahip kontrplaklar ile karşılaştırıldıklarında, daha az su

absorbe etmeleri nedeni ile daha düşük kalınlık artışı değerleri vermeleri beklenen bir sonuçtur. Literatürde yoğunluğu yüksek olan levhada daha fazla odunsu hücrenin varlığı yüksek oranda su absorbe etmesine sebebiyet verdiği ifade edilmiştir (Çolak vd., 2011).

Pres parametreleri dikkate alındığında pres sıcaklığı ve süresinin artması ile birlikte kalınlık artışı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni yukarıdaki açıklamaya bağlı olarak çalışma kapsamında uygulanan yüksek pres sıcaklığı ve sürelerinde daha yüksek levha yoğunluk değerlerinin elde edilmesi gösterilebilir. Ayrıca kontrplakların üretim aşamasında uygulanan sıcaklık, basınç ve süre ile hücrelerin sıkışması, ezilmesi ve bağlayıcı ile kapanması neticesinde levhaların daha su itici bir özellik kazandığı ifade edilmektedir (Maloney, 1977; Lehmann, 1974).

2 ve 24 Saatte Su Alma

Kayın kontrplaklar için yapılan varyans analizi sonuçlarına göre; bağlayıcı türü, kurutma tipi, pres sıcaklığı ve pres süresinin kontrplakların su alma değerleri üzerine olan etkileri anlamlı bulunmuş ve ortalamaların karşılaştırılması Tablo 5'te verilmiştir. 2 saatte su alma değerlerine göre; kayın kontrplaklar için en yüksek su alma değerlerini veren bağlayıcı türü XPS olmuştur. En düşük su alma değerleri ise ÜF ile üretilen kontrol grubundan sonra S3 de bulunmuştur. 24 saat için ise en yüksek su alma değerlerini veren bağlayıcı türleri S1 ve S2 olmuştur. En düşük su alma değerleri ise ÜF ile üretilen kontrol grubundan sonra S5 de bulunmuştur. Doğal kurutulan kaplamalardan üretilen kontrplakların su alma değerleri teknik kurutmaya göre daha yüksek bulunmuştur. Pres parametreleri incelendiğinde 2 saat için en yüksek su alma değerleri; 130°C pres sıcaklığında ve 6 dk pres süresinde; en düşük değerler ise, 150°C pres sıcaklığında ve 10 dk pres süresinde elde edilmiştir. 24 saat için ise; en yüksek su alma değerleri, 130°C pres sıcaklığında ve 6 dk

pres süresinde; en düşük değerler ise, 140°C pres sıcaklığında ve 10 dk pres süresinde elde edilmiştir.

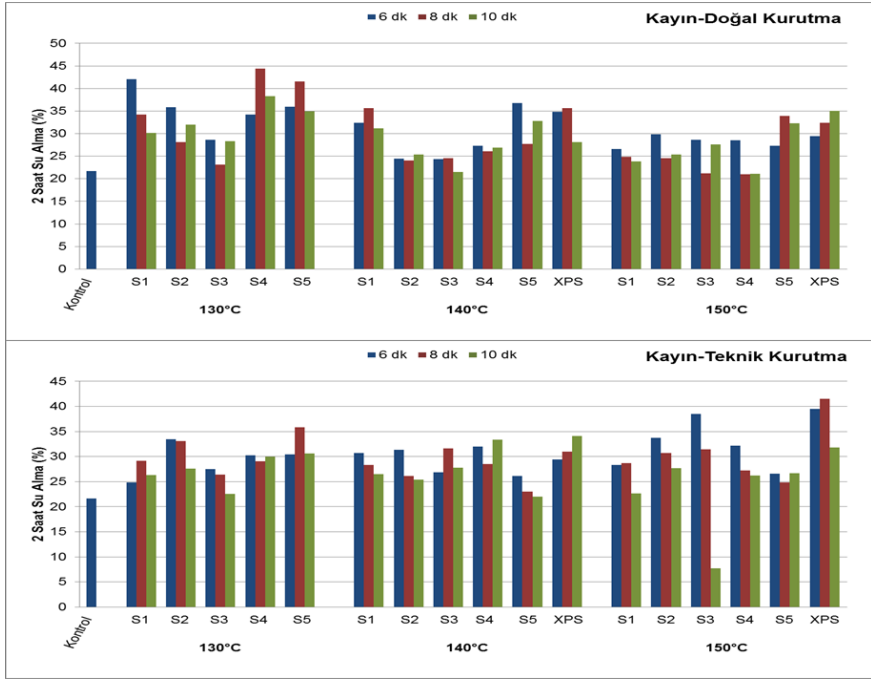
Tablo 5. Kayından üretilmiş kontrplak levhalarının su alma değerleri üzerine etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Newman-Keuls testi sonuçları ($p \leq 0,05$)

Varyans Kaynakları		N	Su Alma (%)			
			2 saat		24 saat	
Bağlayıcı						
Türünün Etkisi	Kontrol	360	21,67	a	35,72	a
	(ÜF)	360	29,25	c	45,56	f
	S1	360	28,82	c	45,11	f
	S2	360	26,01	b	43,57	d
	S3	360	29,81	d	42,92	c
	S4	360	30,53	e	42,07	b
	S5	240	33,57	f	44,44	e
	XPS					
Kurutma Tipinin						
Etkisi	Doğal	1200	28,67	b	43,08	b
	Teknik	1200	27,88	a	42,29	a
Pres Sıcaklığının						
Etkisi	130°C	720	29,97	c	44,84	c
	140°C	840	27,72	b	41,49	a
	150°C	840	27,37	a	42,05	b
Pres Süresinin						
Etkisi	6 dk	800	29,48	c	44,12	c
	8 dk	800	28,49	b	42,28	b
	10 dk	800	26,84	a	41,67	a

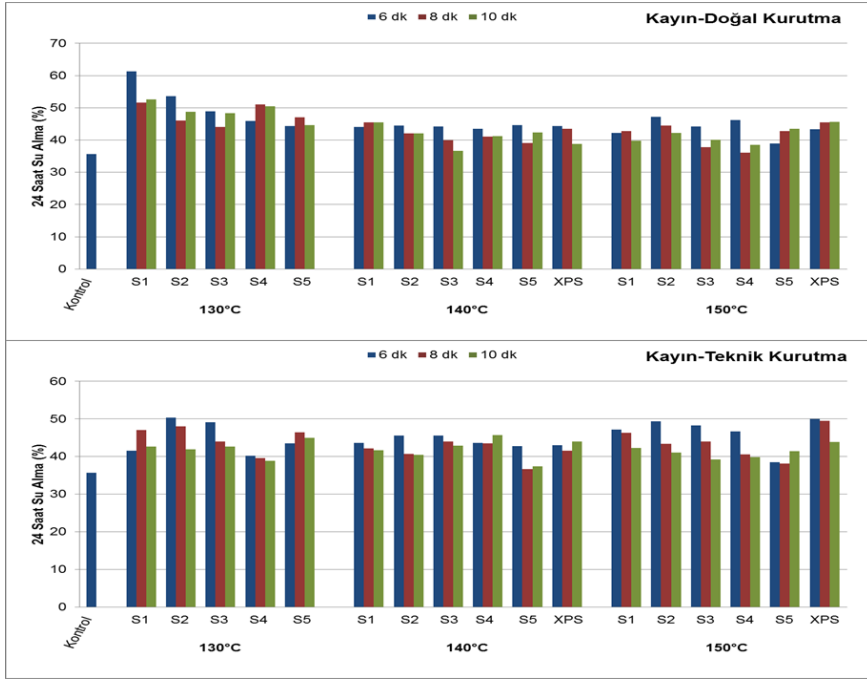
*Farklı harfler istatistiksel olarak belirgin bir fark olduğunu belirtmektedir

Kayın kaplama levhalarından üretilen kontrplak levhalarının su alma değerleri üzerine, kaplama kurutma tipi, bağlayıcı türü, uygulanan pres süresi ve sıcaklığının etkisi Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir.

Şekil 4. Doğal ve teknik kurutma uygulanmış kayın kaplamalardan üretilen kontrplak levhalarının 2 saatte su alma test sonuçları



Şekil 5. Doğal ve teknik kurutma uygulanmış kayın kaplamalardan üretilen kontrplak levhalarının 24 saatte su alma test sonuçları



Şekil 4 ve 5'te görüldüğü üzere genel olarak, teknik kurutma uygulanmış kayın kaplamalardan üretilen kontrplak levhaların su alma oranları daha düşük, doğal kurutma uygulanmış levhaların ise daha yüksek çıkmıştır. Pres sıcaklığının artması (özellikle 150 °C) ve pres süresinin uzaması (8–10 dk), her iki kurutma yönteminde de su alma değerlerini genel olarak düşürmüştür. Bu bulgular, teknik kurutmanın ve uygun pres parametrelerinin kontrplak levhaların suya karşı direncini ve boyutsal kararlılığını artırdığını göstermektedir.

Kompozit malzemenin su alma davranışı, matris ve lif içeriği, lif ve matris tipi, lif işlemi ve işleme koşulları gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, EPS bazlı kompozitlerin su alma özellikleri, EPS matrisine, takviye boyutuna, takviye içeriğine, lifin kimyasal

işlemine ve diğerlerine bağlıdır (Seid vd., 2025). Araştırmacıların (Foti vd., 2022; Victor, 2020) bildirdiğine göre, EPS matris içeriği arttıkça EPS bazlı kompozitin su alma özelliklerinde azalma görülmüştür; bu, matrisin hidrofilik doğası ve takviye malzemesinin hidrofobik doğasından kaynaklanmaktadır. Bazen EPS içeriğindeki artışla birlikte su alımı artar; bu, kompozitte oluşan ve su geçirgenliğini etkileyebilen boşlukların, aralıkların veya açık hücreli yapıların varlığından kaynaklanmaktadır. Kompozit içindeki daha yüksek gözeneklilik veya açık hücre içeriği, su alma oranlarının artmasına yol açabilmektedir (Foti vd., 2022; Victor, 2020).

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, doğal ve teknik kurutma uygulanmış kayın kaplamalardan üretilen polistren esaslı kontrplak levhalarda bağlayıcı türü, pres sıcaklığı ve pres süresinin su alma ve boyutsal stabilite üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, üretim parametrelerinin hem kısa süreli (2 saat) hem de uzun süreli (24 saat) suya maruz kalma koşullarında levha performansını anlamlı düzeyde etkilediğini göstermektedir.

Genel olarak teknik kurutma uygulanmış kaplamalardan üretilen kontrplak levhalar, doğal kurutma uygulanmış levhalara kıyasla daha düşük su alma oranları sergilemiştir. Teknik kurutma ile 2 saatlik su alma değerlerinde yaklaşık %3-5, 24 saatlik su alma değerlerinde ise %2-3 oranında bir azalma sağlanmıştır. Benzer şekilde, kalınlık artışı değerleri teknik kurutma gruplarında doğal kurutmaya göre ortalama %8-10 daha düşük gerçekleşmiştir. Bu durum, teknik kurutmanın presleme sırasında daha homojen bir bağ yapısı oluşturduğunu ve su difüzyonunu sınırladığını ortaya koymaktadır.

Bağlayıcı türü açısından, düşük yoğunluklu EPS kullanılan levhalar daha yüksek su alma oranları göstermiş, buna karşılık yüksek yoğunluklu EPS (S5) ve XPS kullanılan gruplar daha dengeli

ve düşük su alma değerleri sunmuştur. Özellikle 24 saatlik testlerde, S1 ve S2 gruplarında su alma oranları %45 seviyelerine ulaşırken, S5 ve XPS gruplarında bu değerler %42 civarında kalmıştır (Şekil 5). Bu sonuçlar, bağlayıcı yoğunluğunun polistren esaslı kontrplakların nem davranışı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Presleme parametreleri değerlendirildiğinde, pres sıcaklığının 130 °C'den 150 °C'ye çıkarılması, 2 saatlik su alma oranlarında yaklaşık %8–10, 24 saatlik su alma oranlarında ise %6–7 oranında azalma sağlamıştır. Benzer şekilde, pres süresinin 6 dakikadan 10 dakikaya uzatılması ile su alma değerlerinde %5–10 aralığında bir iyileşme elde edilmiştir. Bu durum, polistrenin kaplamalar arasında yeterli akış ve süreklilik sağlaması açısından yüksek sıcaklık ve daha uzun pres sürelerinin gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

Enerji ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, teknik kurutmanın daha yüksek enerji girdisi gerektirmesine rağmen, elde edilen daha düşük su alma ve kalınlık artışı değerleri sayesinde ürün servis ömrünü uzatarak yaşam döngüsü maliyetlerini düşürebileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, doğal kurutma enerji tüketimini azaltma potansiyeline sahip olmakla birlikte, boyutsal stabilite üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle yalnızca yüksek yoğunluklu polistrenler ve optimize edilmiş pres parametreleri ile birlikte kullanılması önerilmektedir.

Sonuç olarak, yüksek yoğunluklu EPS veya XPS bağlayıcılar, 140-150 °C pres sıcaklığı ve 8-10 dakikalık pres süreleri ile birlikte kullanıldığında, formaldehit içermeyen polistren esaslı kontrplak levhaların endüstriyel ölçekte üretimi için teknik olarak uygulanabilir ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif sunduğu söylenebilir. Bu yaklaşım, hem formaldehit emisyonlarının ortadan kaldırılması hem de geri dönüştürülebilir polistren

atıklarının değ erlendirilmesi açısından kontrplak endüstrisi için önemli bir potansiyel ortaya koymaktadır.

Teşekkür

Yazarlar 214O743 nolu proje için sağladığı finansal destek için Türk Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (T B TAK) teşekkürü bir borç bilir.

Kaynakça

Aydin, I. (2004). Activation of wood surfaces for glue bonds by mechanical pre-treatment and its effects on some properties of veneer surfaces and plywood panels. *Applied surface science*, 233(1-4), 268-274.

Aydin, I., & Colakoglu, G. (2005). Effects of surface inactivation, high temperature drying and preservative treatment on surface roughness and colour of alder and beech wood. *Applied Surface Science*, 252(2), 430-440.

Aydin, I., & Colakoglu, 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.

Baldwin, R., F., (1995). *Plywood and Veneer-Based Products: Manufacturing Practices*, Miller Freeman Books, San Francisco, California, USA.

Borysiuk, P., Mamiński, M. Ł., Parzuchowski, P., & Zado, A. (2010). Application of polystyrene as binder for veneers bonding—The effect of pressing parameters. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68(4), 487-489.

Bozkurt, A., Y., (1992). Odun Anatomisi. İstanbul: *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları*, Yayın No: 415.

Chiang, T., C., Osman, M., S., & Hamdan, S., (2014). Water Absorption and Thickness Swelling Behavior of Sago Particles Urea Formaldehyde Particleboard, *International Journal of Science and Research*, 3(12), 1375-1379.

Costa, N., A., Pereira, J., Ferra, J., Cruz, P., Martins, J., Magalhaes, F., D., Mendes, A. & Carvalho, L., H., (2013). Scavengers for Achieving Zero Formaldehyde Emission of Wood-Based Panels, *Wood Science and Technology*, 47, 1261-1272.

Çolak, S., Nemli, G., Demirkir, C., Aydın, İ. & Demirel, S., (2011). Utilization Potential of Waste From Window Joints for Particleboard, *Journal of Composite Materials*, 45, 29-37.

Çolak, S., Öztürk, H. & Demir, A., (2016). Yapıştırıcı Olarak Atık Naylon Kullanılarak Üretilen Kontrplakların Bazı Teknolojik Özellikleri, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5, 21-27.

Çolakoğlu, G. & Örs, Y., (1999). Kavak Kontrplakların Formaldehit Emisyonuna Bazı Üretim Faktörlerinin Etkisi, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 20, 201-205.

Demirkir, C., Colak, S. & Aydın, I., (2013). Some Technological Properties of Wood–Styrofoam Composite Panels, *Composites: Part B*, 55, 513–517.

Deng, S., Du, G., Li, X. & Pizzi, A., (2014). Performance and Reaction Mechanism of Zero Formaldehyde-Emission Urea-Glyoxal (UG) Resin, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45, 2029-2038.

Ertuğrul, Ö., L., Trandafir, A., C. & Özkan, M., Y., (2012). Yanal Zemin Basınçlarının EPS Köpük Kullanılması Vasıtasıyla Azaltılması, *İMO Teknik Dergi*, 5885-5901.

Fang, L., Chang, L., Guo, W. J., Ren, Y. P., & Wang, Z. (2013). Preparation and characterization of wood-plastic plywood bonded with high density polyethylene film. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(6), 739-746.

Foti, D., Voulgaridou, E. E., Karastergiou, S., Taghiyari, H. R., & Papadopoulos, A. N. (2022). Physical and mechanical properties of eco-friendly composites made from wood dust and recycled polystyrene. *Journal of Renewable Materials*, 10(1), 75.

Gangi, M., Tabarsa, T., Sepahvand, S. & Asghari, J., (2013). Reduction of Formaldehyde Emission From Plywood, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(13), 1407-1417.

Güç, A., (2008). Yapılarda Ekstrude Polistren Isı Yalıtımı, *İzolasyon Dünyası Dergisi*, 52(2), 30-31.

Halligan, A., F. & Schiewind, A., P., (1974). Prediction of Particleboard Mechanical Properties at Varios Moisture Content, *Wood Science Technology*, 8, 68-78.

Hu, Y., Nakao, T., Nakai, T., Gu, J. & Wang, F., (2005). Vibrational Properties of Wood Plastic Plywood, *Jornal of Wood Science*, 51, 13–7.

Huang, J. & Li, K., (2008). A New Soy Flour-Based Adhesive for Making Interior Type II Plywood, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 85, 63–70.

IARC, (2006). Formaldehyde, 2-butoxyethanol and 1-tertbutoxypropan-2-ol, IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum, 88, 1–478. PMID:17366697.

Kim, S., (2009). The Reduction of Indoor Air Pollutant From Wood-Based Composite by Adding Pozzolan for Building Materials, *Construction and Building Materials*, 23(6), 2319–2323.

Kishi, H., Fujita., A., Miyazaki, H., Matsuda, S. & Murakami, A., (2006). Synthesis of Wood-Based Epoxy Resins and Their Mechanical and Adhesive Properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 102, 2285–92.

Lehmann, W., F., (1974). Improved Particleboard Through Better Resin Efficiency, *Forest Product Journal*, 15, 155-161.

Lei, H., Du, G., Wu, Z., Xi, X. & Dong, Z., (2014). Cross-Linked Soy-Based Wood Adhesives for Plywood, *International Journal of Adhesion and Adhesive*, 50, 199-203.

Liu, Y. & Li, K., (2007). Development and Characterization of Adhesives From Soy Protein for Bonding Wood, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27, 59–67.

Maloney, T., (1977). *Modern Particle Board and Dry-Process Fiberboard Manufacturing*, Miller Freeman Publications, San Francisco, California.

Maloney, T., M., (1970). Resin Distribution in Layered Particleboard, *Forest Products Journal*, 20, 43-52.

Myers, G., E., (1984). How Mole Ratio of UF Resin Affects Formaldehyde Emission and Other Properties—A Literature Critique, *Forest Products Journal*, 34(5), 35–41.

Najafi, S., K., (2013). Use of Recycled Plastics in Wood Plastic Composites - A review, *Waste Management*, 33, 1898-1905.

Seid, A. M., Adimass, S. A., Salilew, W. M., Vignesh, K., Paramasivam, V., & Fentaw, B. A. (2025). Recent Progress on the Physical, Thermal, and Mechanical Properties of Expanded Polystyrene Waste–Based Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2025(1), 9285040.

Shalbafan, A., (2013). Investigation of Foam Materials to be Used in Lightweight Wood-Based Composites, Doctor of Natural Science Faculty of Mathematics, Informatics and Natural Sciences, University of Hamburg, Hamburg.

Sundman, R., S., Larsen, A., Vestin, E. & Weibull, A., (2007). Formaldehyde Emission - Comparison of Different Standard Methods, *Atmospheric Environment*, 41, 3193-3202.

Tang, L., Zhang, Z., Qi, J., Zhao, J. & Feng, Y., (2011). The Preparation and Application of A New Formaldehyde-Free Adhesive for Plywood, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31, 507-512.

TS EN 317, (1999). Yonga Levhalar ve Lif Levhalar-Su İçerisine Daldırma İşleminde Sonra Kalınlığına Şişme Tayini, Türk Standardları Enstitüsü.

Victor, O. O. (2020). Preparation and properties of rice husk fiber based polystyrene composites from wastes streams. *IOSR Journal of Engineering*, 10(1), 6-16.

Zhu, X., Xu, E., Lin, R., Wang, X. & Gao, Z., (2014). Decreasing the Formaldehyde Emission in Urea-Formaldehyde Using Modified Starch by Strongly Acid Process, *Journal of Applied Polymer Science*, 1-6.

BÖLÜM 11

MDF PANELLERİN CNC İLE İŞLENMESİNDE ENERJİ TÜKETİMİ VE MALİYET ANALİZİ

1. ABDULLAH UĞUR BİRİNCİ¹

2. AYDIN DEMİR²

3. HASAN ÖZTÜRK³

Giriş

Günümüzün imalat sektöründe, Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (CNC) sistemleri, yüksek hassasiyetleri, güvenilirlikleri ve otomasyon özellikleri nedeniyle üretimin temel taşlarından biri haline gelmiştir. Bu sistemler, aletlerin ve makine parçalarının hareketlerinin doğrudan bilgisayar tarafından kontrol edilmesini sağlayarak frezeleme, kesme ve oyma gibi geleneksel işleme operasyonlarını dönüştürmüştür (Deshpande vd., 2018; Raut vd., 2019; Ahmed vd., 2025).

Ağaç işlemede CNC teknolojisinin kullanıma girmesiyle üretim teknolojisinde büyük değişiklikler meydana gelmiştir.

¹ Arş. Gör. Dr, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-3273-3615

² Doç. Dr, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-4060-2578

³ Doç. Dr, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Ormancılık Bölümü, Orcid: 0000-0002-5422-7556

Önceden mekanik olarak kontrol edilen seri üretim, bilgisayar tabanlı sayısal kontrollere değiştirilmiştir. Çeşitli işleme yöntemleri, imalat ve üretim lojistiği için bilgisayarların kullanılması, üretim sürecinin esnekliğini artırmıştır. Bunun doğrudan bir sonucu olarak, kapıdan kapıya teslimat ve işleme süreleri kısalmış ve dolayısıyla stokta bağlı sermaye azalmıştır. Bununla birlikte, CNC teknolojisi zanaatkarların işlerinde mekanik üretim yöntemleri üzerinde de güçlü bir etkiye sahiptir. İş parçaları tek bir sıkıştırma ile işlenebilir, böylece sadece geleneksel manuel üretim yöntemleri değil, aynı zamanda esnek ve tam otomatik sipariş işleme de gerçekleştirilebilir. Ayrıca, çok eksenli CNC üretim teknolojisi, daha önce bilgisayar teknolojileri ve kontrol bileşenleri olmadan maliyet etkin bir şekilde üretilmeyen spiral merdivenler, pencereler, kapılar ve masif ahşap mobilyalar gibi karmaşık üç boyutlu yapıların üretimine olanak tanımaktadır (Heisel vd., 1996).

CNC ahşap işleme, şu anda mobilya endüstrisi alanında önemli bir araştırma konusudur (Atanasov, 2021). Teknolojik gelişmelerle birlikte, bu ahşap işleme yöntemi endüstride giderek daha fazla uygulanmakta ve ahşap işleme tesislerinde CNC makinelerinin sayısı artmaktadır (Hanincová vd., 2024; Šugárová, vd., 2025).

Son yıllarda, işlem parametrelerinin güç tüketimine etkileri ve enerji tüketimi ile işleme koşulları arasındaki ilişkiler giderek daha fazla ilgi görmektedir. Ahşap malzemelerin CNC makineleri ile işlenmesi sırasında, iş parçası, ilerleme hızı ve kesici bıçağın geometrik parametreleri; kesme kuvveti, yüzey kalitesi ve enerji tüketimi üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu belirtilmektedir (Li vd., 2020; Yang vd., 2020; Palubicki, 2021; Pinkowski vd., 2021).

İmalat sanayileri, birçok ülke ve bölgede küresel enerji tüketiminin neredeyse üçte birini oluşturan başlıca enerji tüketicileridir (Sihag & Sangwan, 2020). Enerji kaynaklarının kullanımı, olumsuz çevresel etkiler ve küresel ısınma sorunlarına yol

açmaktadır. Endüstriyel ürünlerin imalat sürecinde, enerji verimliliğini artırmak, karbon emisyonunu ve üretim maliyetlerini azaltmak için etkili bir yaklaşımdır (Wang vd., 2019). Aynı zamanda, güç tüketimi, ahşap malzemelerin imalatında kesme sürecinin optimizasyonunu ve süreç izlemeyi belirleyebilmektedir (Nasir & Cool, 2020, Wu vd., 2020, Dong vd., 2021, Li vd., 2023).

Ahşabın fiziksel ve mekanik özellikleri (tür, yoğunluk, sertlik ve nem), kesici alet geometrisi (takım çapı ve şekli, burun yarıçapı, takım malzemesi ve takım açısı), makine işleme koşulları (ilerleme hızı, kesme derinliği, iş mili hızı ve kesme genişliği) ile kesme kuvvetleri ve titreşimlerin etkileşimi gibi işleme koşulları güç tüketimi üzerinde etkilidir (Csanády & Magoss, 2013; Van Thuy & Nguyen, 2018; Jiang vd., 2022; Li vd., 2022; Sofuoglu vd., 2023; Çakmak & Bayram, 2025).

Bu çalışmanın temel amacı, farklı spindle devirleri, kesim genişliği, kesici takım geometrileri ve takım yolu stratejilerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınarak oluşturulan işleme parametrelerinin enerji tüketimini ayrıntılı biçimde ortaya koymak ve bu parametrelerin üretim maliyetleri üzerindeki belirleyici etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmektir.

Materyal ve Metod

Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde faaliyet gösteren ticari bir tedarikçiden, $18 \times 2100 \times 2800$ mm (kalınlık $\times$ genişlik $\times$ uzunluk) boyutlarında MDF paneller temin edilmiştir. Kullanılan MDF panellerin ortalama yoğunluğu 750 kg/m^3 , denge nem içeriği ise %8 olarak belirlenmiştir. Numunelerin işlenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi pilot tesisinde bulunan 9 kW iş mili gücüne sahip ve maksimum 24.000 dev/dak spindle devrine ulaşabilen AES Nova 2128 üç eksenli CNC freze makinesi (Şekil 1) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CNC işleme süreçlerine ait kontrol kodları (G-Code) AlphaCAM yazılımı aracılığıyla oluşturulmuştur.

Şekil 1. AES Nova 2128 CNC router makinesi



Bu araştırma doğrultusunda CNC işleme parametreleri kapsamında üç farklı spindle devri (18000, 21000 ve 24000 dev/dak) ile dört farklı kesim genişliği (1.5, 3, 4.5 ve 6 mm) tanımlanmıştır. Deneysel çalışmanın tüm gruplarında dalış hızı ile kesme hızı parametreleri 2000 m/dak olarak sabitlenmiştir.

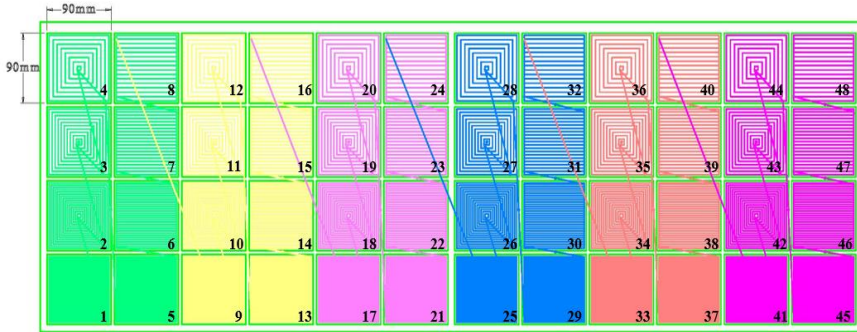
Deneysel çalışmalarda, her ikisi de 6 mm çapında olan iki farklı kesici takım kullanılmıştır: çift kanallı düz freze ucu ve spiral freze ucu. Spiral freze ucu, karbür malzemeden imal edilmiş, üç kanallı ve 22° helis açısına sahip olacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca, karbür uçlu, 3° üretim kesme açısına sahip ve düz dalma özelliği bulunan çift kanallı bir matkap ucu da kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kesici takımlar Şekil 2’de gösterilmektedir.

Şekil 2. (a) çift kanallı düz freze ve (b) spiral frezenin kesici uçları



Tüm numunelerin CNC işlenmesi sürecinde, kontur boşaltma ve çizgisel boşaltma takım yolu stratejileri uygulanmıştır. Şekil 3'te, CNC makinesi tarafından gerçekleştirilen işleme sırasında kullanılan takım yolu teknikleri ile işlenen farklı MDF numune grupları görsel olarak sunulmaktadır.

Şekil 3. Çalışma kapsamında uygulanan takım yolu stratejilerinin şematik gösterimi



Bu çalışmada toplam 48 farklı deney grubu oluşturulmuştur. 1–24 numaralı gruplar, çift kanallı düz freze ucu kullanılarak işlenirken; 25–48 numaralı gruplar spiral freze ucu ile işlenmiştir. Deneylerde üç farklı iş mili (spindle) devri uygulanmış olup, 18000 dev/dak 1–8 ve 25–32 numaralı gruplarda, 21000 dev/dak 9–16 ve

33–40 numaralı gruplarda, 24000 dev/dak ise 17–24 ve 41–48 numaralı gruplarda kullanılmıştır.

Boşaltma stratejisi olarak iki farklı takım yolu tercih edilmiştir. Kontur boşaltma yöntemi; 1–4, 9–12, 17–20, 25–28, 33–36 ve 41–44 numaralı gruplarda uygulanırken, çizgisel boşaltma yöntemi 5–8, 13–16, 21–24, 29–32, 37–40 ve 45–48 numaralı gruplarda kullanılmıştır. Kesme genişliği parametresi ise her bir grup setinde sırasıyla 1.5 mm, 3.0 mm, 4.5 mm ve 6.0 mm olacak şekilde kademeli olarak belirlenmiştir.

Araştırmadaki her deney grubu için, 90 × 90 mm ölçülerinde bir alan CNC ile işlenmiştir.

Enerji tüketim değerleri, her bir numune için entegre kamera özelliğine sahip bir wattmetre (Hidance P06S-100) kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler, 50 Hz örnekleme frekansında gerçekleştirilmiş olup cihazın nominal ölçüm kapasitesi 100 A ve 22.000 W'tır (Şekil 4).

Şekil 4. Wattmetre (Hidance P06S-100)



CNC işleme süreçlerine ait maliyet analizi, her bir deney grubu için ölçülen kesme süresi ve enerji tüketimi verileri esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Analizde toplam üretim maliyeti, işçilik ve amortisman maliyetleri olmak üzere iki temel bileşen üzerinden değerlendirilmiştir. Enerji tüketimi, makine enerji sayacından okunan başlangıç ve bitiş değerleri arasındaki farktan hesaplanmış;

enerji maliyeti, birim elektrik fiyatı kullanılarak Türk Lirası cinsine dönüştürülmüştür. Ancak enerji maliyetinin toplam maliyet içerisindeki payının düşük olması nedeniyle, toplam maliyet hesaplamasında belirleyici bileşenler olarak zaman temelli maliyet kalemleri öne çıkmıştır.

Kesme süresi, CNC tezgâhı tarafından kaydedilen işlem süresi (dk) olarak alınmıştır. İşçilik maliyeti, kesme süresinin saatlik işçilik maliyeti ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır. Amortisman maliyeti ise, makinenin saatlik amortisman bedelinin kesme süresi ile orantılı olarak dağıtılması yoluyla belirlenmiştir. Böylece her bir deney grubu için işlem süresine bağlı işçilik ve amortisman maliyetleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Toplam üretim maliyeti; enerji, işçilik ve amortisman maliyetlerinin toplanmasıyla elde edilmiştir.

Bulgular ve Tartışma

CNC işleme sırasında enerji tüketimi, her bir deney grubu için makine enerji sayacından okunan başlangıç ve bitiş değerleri arasındaki farktan hesaplanmıştır. Ölçümler, aynı makine ve sabit işleme koşulları altında gerçekleştirilmiş olup deneyler boyunca tutarlı ve tekrarlanabilir bir veri seti elde edilmiştir. Toplam 48 deney grubuna ait enerji sayaç değerleri, bunlardan türetilen enerji tüketimleri ve kesme süreleri Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Düz freze ile işlenen deney gruplarına ait enerji sayaç değerleri, kesme süresi ve enerji tüketimi

Grup No	Enerji Sayaç Başlangıcı (kWh)	Enerji Sayaç Bitişi (kWh)	Enerji Tüketimi (kWh)	Kesme Süresi (dk)
1	700.96	701.07	0.11	2.46
2	701.36	701.42	0.06	1.26
3	701.42	701.47	0.05	1.00
4	701.47	701.50	0.03	0.47
5	701.50	701.61	0.11	2.51
6	701.61	701.68	0.07	1.31
7	701.68	701.72	0.04	1.04
8	701.72	701.75	0.03	0.50
9	702.87	702.98	0.11	2.46
10	702.98	703.04	0.06	1.26
11	703.04	703.08	0.04	1.00
12	703.08	703.11	0.03	0.47
13	703.11	703.23	0.12	2.51
14	703.23	703.29	0.06	1.31
15	703.29	703.33	0.04	1.04
16	703.33	703.37	0.04	0.50
17	703.37	703.49	0.12	2.51
18	703.49	703.55	0.06	1.31
19	703.55	703.59	0.04	1.04
20	703.59	703.62	0.03	0.50
21	703.62	703.73	0.11	2.46
22	703.73	703.79	0.06	1.26
23	703.79	703.83	0.04	1.00
24	703.83	703.86	0.03	0.47

Not: Enerji tüketimi, her bir deney grubu için ölçülen başlangıç ve bitiş enerji sayaç değerleri arasındaki farktan hesaplanmıştır. Deney gruplarının oluşturulmasında kullanılan işleme parametreleri (kesici türü, spindle devri, boşaltma stratejisi ve kesme genişliği) yöntem bölümünde ayrıntılı olarak tanımlanmıştır.

Tablo 1'in devamı

Grup No	Enerji Sayaç Başlangıcı (kWh)	Enerji Sayaç Bitişi (kWh)	Enerji Tüketimi (kWh)	Kesme Süresi (dk)
25	703.86	703.97	0.11	2.46
26	703.97	704.03	0.06	1.26
27	704.03	704.07	0.04	1.00
28	704.07	704.10	0.03	0.47
29	704.10	704.22	0.12	2.51
30	704.22	704.28	0.06	1.31
31	704.28	704.32	0.04	1.04
32	704.32	704.36	0.04	0.50
33	704.36	704.47	0.11	2.46
34	704.47	704.53	0.06	1.26
35	704.53	704.57	0.04	1.00
36	704.57	704.60	0.03	0.47
37	704.60	704.72	0.12	2.51
38	704.72	704.78	0.06	1.31
39	704.78	704.82	0.04	1.04
40	704.82	704.86	0.04	0.50
41	704.86	704.97	0.11	2.46
42	704.97	705.03	0.06	1.26
43	705.03	705.07	0.04	1.00
44	705.07	705.10	0.03	0.47
45	705.10	705.22	0.12	2.51
46	705.22	705.28	0.06	1.31
47	705.28	705.32	0.04	1.04
48	705.32	705.36	0.04	0.50

Not: Enerji tüketimi, her bir deney grubu için ölçülen başlangıç ve bitiş enerji sayaç değerleri arasındaki farktan hesaplanmıştır. Deney gruplarının oluşturulmasında kullanılan işleme parametreleri (kesici türü, spindle devri, boşaltma stratejisi ve kesme genişliği) yöntem bölümünde ayrıntılı olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışmada CNC işleme sırasında ölçülen enerji tüketimi ve kesme süresi değerleri, daha önce tanımlanan deney grupları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Çift kanallı düz freze kullanılan 1–24 numaralı gruplar ile spiral freze kullanılan 25–48 numaralı gruplar karşılaştırıldığında, her iki kesici takım türünde de enerji tüketiminin kesme süresiyle doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Bununla birlikte, spiral freze kullanılan gruplarda kesme süresinin daha dengeli dağıldığı ve buna bağlı olarak enerji tüketimindeki değişkenliğin daha sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, spiral frezenin talaş tahliyesi ve kesme stabilitesi açısından daha kararlı bir işleme koşulu sağladığını göstermektedir. Triebe vd., (2018) tarafından yapılan çalışmada da benzer olarak takım seçiminin kesme işleminin enerji tüketimini etkilediği belirtilmiştir.

Spindle devrinin etkisi incelendiğinde, 18.000 dev/dak'tan 24.000 dev/dak'a doğru artan spindle devrinin, aynı kesme genişliği ve takım yolu stratejisi altında kesme süresini azalttığı ve buna bağlı olarak toplam enerji tüketimini düşürdüğü tespit edilmiştir. Bal vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada spindle devrinin enerji tüketimi üzerinde %23,1 oranında etkili olduğu belirtilmiştir. Özellikle 24.000 dev/dak uygulanan gruplarda daha kısa işlem süreleri elde edilmiş ve bu durum enerji tüketiminin görece düşük seviyelerde kalmasını sağlamıştır. Bu bulgu, yüksek spindle devirlerinin CNC işleme süreçlerinde enerji verimliliği açısından avantaj sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Boşaltma stratejileri karşılaştırıldığında, çizgisel boşaltma uygulanan gruplarda kontur boşaltmaya kıyasla daha kısa kesme süreleri ve daha düşük enerji tüketimi değerleri elde edilmiştir. Çizgisel boşaltmanın daha az yön değişimi ve daha sürekli bir takım hareketi sağlaması, işlem süresinin kısılmasına ve dolayısıyla enerji tüketiminin azalmasına katkıda bulunmuştur. Buna karşılık, kontur boşaltma stratejisinde takımın daha karmaşık bir yol izlemesi, kesme süresini ve enerji sarfiyatını artırmıştır.

Kesme genişliği parametresi değerlendirildiğinde, 1,5 mm'den 6,0 mm'ye doğru artan kesme genişliği ile birlikte kesme süresinde ve enerji tüketiminde belirgin bir azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Özellikle 1,5 mm kesme genişliği uygulanan gruplarda enerji tüketimi değerlerinin üst sınırlara yaklaştığı görülmüştür. Benzer şekilde Zhao vd., (2020) tarafından yapılan

Çalışmada da kesim genişliği arttığında enerji tüketiciminin azaldığı belirtilmiştir. Bu sonuç, kesme genişliğinin CNC işleme sırasında enerji tüketicimini belirleyen temel parametrelerden biri olduğunu göstermektedir.

Tüm deney grupları birlikte değerlendirildiğinde, kesme süresi ile enerji tüketimi arasında çok güçlü ve pozitif yönlü bir ilişki tespit edilmiştir. Kesme süresinin artmasıyla birlikte enerji tüketiciminin neredeyse doğrusal bir biçimde arttığı görölmüş, bu durum enerji tüketiciminin büyük ölçüde işlem süresi tarafından belirlendiğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla, kesici takım türü, spindle devri, boşaltma stratejisi ve kesme genişliği gibi parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki etkilerinin, doğrudan veya dolaylı olarak kesme süresi üzerinden gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır.

CNC işleme deney gruplarına ait maliyet bileşenleri Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. CNC işleme deney gruplarına ait maliyet bileşenleri

İşlem No	Enerji Maliyeti (TL)	İşçilik Maliyeti (TL)	Amortisman Maliyeti (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	0.2849	4.73878	4.92	9.94368
2	0.1554	2.42718	2.52	5.10258
3	0.1295	1.92633	2.00	4.05583
4	0.0777	0.90538	0.94	1.92308
5	0.2849	4.83510	5.02	10.13997
6	0.1813	2.52350	2.62	5.32480
7	0.1036	2.00339	2.08	4.18699
8	0.0777	0.96317	1.00	2.04086
9	0.3108	4.73878	4.92	9.96958
10	0.1554	2.42718	2.52	5.10258
11	0.1036	1.92633	2.00	4.02933
12	0.1036	0.90538	0.94	1.94898
13	0.2849	4.83510	5.02	10.13997
14	0.1554	2.52350	2.62	5.29890
15	0.1295	2.00339	2.08	4.21288
16	0.0777	0.96317	1.00	2.04086
17	0.3108	4.73878	4.92	9.96958
18	0.1554	2.42718	2.52	5.10258
19	0.1036	1.92633	2.00	4.02933
20	0.1036	0.90538	0.94	1.94898
21	0.2849	4.83510	5.02	10.13997
22	0.1554	2.52350	2.62	5.29890
23	0.1295	2.00339	2.08	4.21288
24	0.0777	0.96317	1.00	2.04086

Tablo 2'nin Devamı

İşlem No	Enerji Maliyeti (TL)	İşçilik Maliyeti (TL)	Amortisman Maliyeti (TL)	Toplam Maliyet (TL)
25	0.2849	4.73878	4.92	9.94368
26	0.1554	2.42718	2.52	5.10258
27	0.1036	1.92633	2.00	4.02933
28	0.0777	0.90538	0.94	1.92308
29	0.3108	4.83510	5.02	10.16590
30	0.1554	2.52350	2.62	5.29890
31	0.1036	2.00339	2.08	4.18699
32	0.1036	0.96317	1.00	2.06677
33	0.3108	4.73878	4.92	9.96958
34	0.1554	2.42718	2.52	5.10258
35	0.1036	1.92633	2.00	4.02933
36	0.0777	0.90538	0.94	1.92308
37	0.3108	4.83510	5.02	10.16590
38	0.1554	2.52350	2.62	5.29890
39	0.1036	2.00339	2.08	4.18699
40	0.1036	0.96317	1.00	2.06677
41	0.3108	4.73878	4.92	9.96958
42	0.1554	2.42718	2.52	5.10258
43	0.1036	1.92633	2.00	4.02933
44	0.0777	0.90538	0.94	1.92308
45	0.3108	4.83510	5.02	10.16590
46	0.1554	2.50423	2.60	5.25963
47	0.1036	2.00339	2.08	4.18699
48	0.0777	0.96317	1.00	2.04086

Tablo 3-4'te sunulan maliyet analizi sonuçları, CNC işleme süreçlerinde toplam üretim maliyetinin büyük ölçüde kesme süresi ve buna bağlı işçilik ile amortisman bileşenleri tarafından belirlendiğini açıkça göstermektedir. İncelenen tüm deney gruplarında toplam maliyetin, kesme süresindeki artışla birlikte düzenli bir biçimde yükseldiği, buna karşılık daha kısa kesme süresi gerektiren işlemlerde maliyetin belirgin şekilde düştüğü görülmektedir. Bu durum, enerji tüketiminin toplam maliyet içerisindeki payının sınırlı kaldığını, zaman temelli maliyet kalemlerinin ise baskın rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Birim zaman başına maliyet değerleri incelendiğinde, tüm deney gruplarında maliyetin yaklaşık olarak 4,0–4,15 TL/dk aralığında değiştiği ve oldukça dar bir bantta toplandığı belirlenmiştir. Bu bulgu, makinenin birim zaman başına maliyetinin büyük ölçüde sabit olduğunu ve toplam maliyet farklılıklarının esas olarak işlem süresinden kaynaklandığını göstermektedir. Dolayısıyla, maliyet açısından en avantajlı işlem koşullarının, birim zaman maliyetini değil, toplam kesme süresini minimize eden parametre kombinasyonları olduğu anlaşılmaktadır.

Enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde, birim zaman başına enerji tüketiminin kısa kesme sürelerinde daha az, uzun kesme sürelerinde ise fazla bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak enerji maliyetinin toplam maliyet içindeki payı sınırlı olduğundan, bu değişimin toplam üretim maliyeti üzerindeki etkisi ikincil düzeyde kalmıştır. Bu sonuç, CNC işleme maliyetlerinin azaltılmasında enerji verimliliğinin tek başına yeterli olmadığını, zaman ve üretkenlik odaklı optimizasyonların daha belirleyici olduğunu göstermektedir.

Genel olarak maliyet analizi, kesme süresinin enerji tüketimi ve toplam üretim maliyeti üzerinde eş zamanlı ve belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, takım yolu stratejilerinin, işleme parametrelerinin ve üretim planlamasının kesme süresini minimize edecek şekilde optimize edilmesi, CNC işleme süreçlerinde hem ekonomik hem de enerji açısından daha verimli bir üretim yaklaşımı sunmaktadır.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, literatürde CNC ile ahşap ve ahşap esaslı levha malzemelerin işlenmesinde enerji tüketimini çoğunlukla tekil işlem parametreleri üzerinden ele alan yaklaşımlardan farklı olarak, MDF işleme sürecini enerji tüketimi–kesme süresi–üretim maliyeti ekseninde bütüncül bir çerçevede değerlendirmektedir. Spindle

devri, kesme genişliği, kesici takım geometrisi ve takım yolu stratejileri; yalnızca enerji tüketimi açısından değil, işçilik ve amortisman gibi zaman temelli maliyet bileşenleri ile birlikte analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, enerji tüketiminin toplam üretim maliyeti içindeki payının sınırlı olduğunu, buna karşılık kesme süresinin hem enerji tüketimi hem de toplam maliyet üzerinde belirleyici rol oynadığını nicel olarak ortaya koymaktadır. Ayrıca, literatürde sınırlı biçimde ele alınan takım yolu stratejilerinin enerji ve maliyet üzerindeki etkileri sistematik olarak karşılaştırılmış ve CNC işleme süreçlerinde enerji verimliliğinin, üretkenlik ve süre optimizasyonu ile birlikte ele alınması gerektiğı gösterilmiştir.

Kaynakça

Ahmed, S. H., Al-Sarraj, G. I., & Abdelhafeez Hassan, A. (2025). CNC machine design and manufacture for laser drawing and engraving. *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, 6(2), 204-211.

Atanasov, V., (2021). Experimental research on the cutting force during longitudinal milling of solid wood and wood-based composites. *Acta Facultatis Xylologiae* 63, 73–84.

Bal, B. C., Mengeloğlu, F., Akçakaya, E., & Gündeş, Z. (2022). Effects of cutter parameters on surface roughness of fiberboard and energy consumption of CNC machine. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 22(3), 264-272.

Csanády, E., & Magoss, E. (2013). *Mechanics of wood machining* (pp. 168-171). Berlin: Springer.

Deshpande, S. V., Karthik, P. U., NK, D., Kumar, V., & Badrinayan, K. S. (2018). Design and fabrication of 3-axis CNC Milling machine. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 6(4), 34-38.

Dong, W. H., Hu, Y., Tian, G. J., Qiu, X. H., & Guo, X. L. (2021). Machine energy utilization rate during milling of PVC/calcium powder/wood fiber composites. *Journal of Forestry Engineering*, 6(3), 107-112.

Hanincová, L., Procházka, J., & Novák, V., (2024). Comparative analysis of cutting forces in CNC milling of MDF: The role of tool coatings, cutting speed, and feed per tooth. *Coatings* 14, 1085

Heisel, U., Krondorfer, H., & Walz, J. (1996). CNC Technology in Woodworking-Nowadays and Future Trends. *WIN - Woodworking International*, 3, s. 16-18.

Jiang, S., Buck, D., Tang, Q., Guan, J., Wu, Z., Guo, X., ... & Wang, X. (2022). Cutting force and surface roughness during straight-tooth milling of Walnut wood. *Forests*, 13(12), 2126.

Li, R., He, C., Xu, W., & Wang, X. (2023). Modeling and optimizing the specific cutting energy of medium density fiberboard during the helical up-milling process. *Wood Material Science & Engineering*, 18(2), 464-471.

Li, R., Yao, Q., Xu, W., Li, J., & Wang, X. (2022). Study of cutting power and power efficiency during straight-tooth cylindrical milling process of particle boards. *Materials*, 15(3), 879.

Li, W. G., Xu, Y. D., Mao, X. D., & Zhang, Z. K. (2020). Study on friction performance between wood radial section and cemented carbide surface with different micro-textures. *Journal of Forestry Engineering*, 5(1), 29-33.

Nasir, V., & Cool, J. (2020). A review on wood machining: characterization, optimization, and monitoring of the sawing process. *Wood Material Science & Engineering*, 15(1), 1-16.

Pałubicki, B. (2021). Cutting forces in peripheral Up-milling of particleboard. *Materials*, 14(9), 2208.

Pinkowski, G., Szymański, W., Piernik, M., & Krauss, A. (2021). Medium-density fibreboard milling using selected technological parameters. *Bioresources*, 16(1), 558.

Raut, M., Shete, G., Shinde, V., & Suryawanshi, A. (2019). Automatic mini cnc machine for pcb drawing using arduino. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6(6), 310-314.

Sihag, N., & Sangwan, K. S. (2020). A systematic literature review on machine tool energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123125.

Sofuoglu, S. D., Tosun, M., & Atilgan, A. (2023). Determination of the machining characteristics of Uludağ fir (*Abies nordmanniana* Mattf.) densified by compressing. *Wood Material Science & Engineering*, 18(3), 841-851.

Šugárová, V., Adamčík, L., & Kminiak, R. (2025). The Influence Of Technical And Technological Parameters Of Cnc Milling On The Surface Quality Of Beech Plywood. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*, 67(1), 35-48.

Triebe, M. J., Mendis, G. P., Zhao, F., & Sutherland, J. W. (2018). Understanding energy consumption in a machine tool through energy mapping. *Procedia Cirp*, 69, 259-264.

Van Thuy, T., & Nguyen, H. L. (2018). Investigation on influence of cutting parameters on spindle vibration of CNC wood milling machine. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 213, p. 01007). EDP Sciences.

Wang, Q., Zhang, D., Chen, B., Zhang, Y., & Wu, B. (2019). Energy consumption model for drilling processes based on cutting force. *Applied Sciences*, 9(22), 4801.

Wu, Y. S., Zhang, W., Yang, Z., & Wang, Y. (2020). Influence factors of drilling power of wood structural component. *Journal of Forestry Engineering*, 5(2), 36-41.

Yang, Y. Q., Wang, S. Y., Zhang, Y. M., Zhang, J., & Luo, B. (2020). Wear mechanism and life of brown corundum abrasive belt in wood sanding process. *Journal of Forestry Engineering*, 5(6), 121-127.

Zhao, G., Li, C., Lv, Z., Cheng, X., & Zheng, G. (2020). Specific energy consumption prediction model of CNC machine tools based on tool wear. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(2), 159-168.

