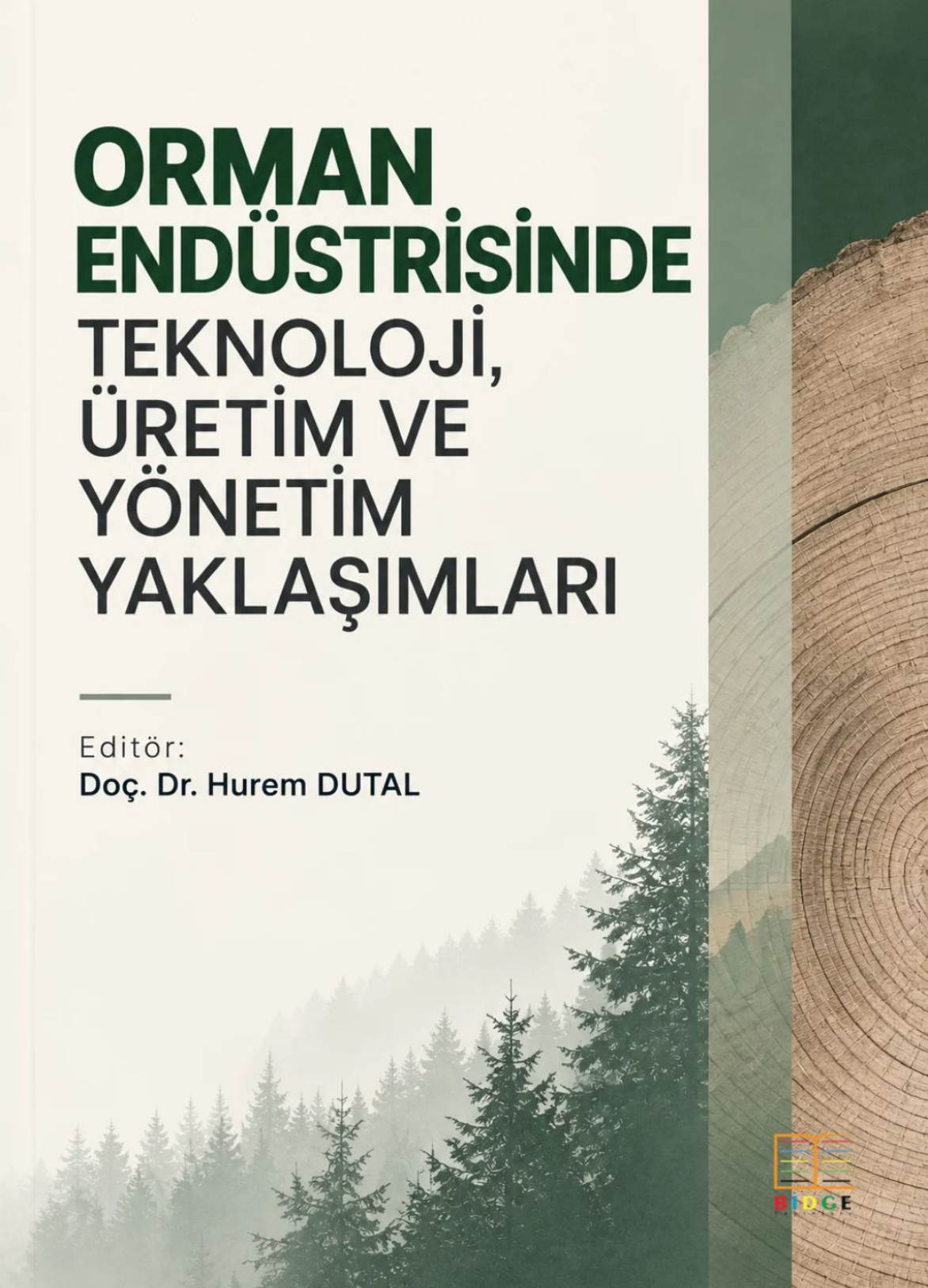
ORMAN ENDÜSTRİSİNDE TEKNOLOJİ, ÜRETİM VE YÖNETİM YAKLAŞIMLARI

Editör:
Doç. Dr. Hurem DUTAL



BİDGE

BİDGE Yayınları

Orman Endüstrisinde Teknoloji, Üretim ve Yönetim Yaklaşımları

Editör: Doç. Dr. Hurem DUTAL

ISBN: 978-625-5057-03-7

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
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 endüstrisi, yenilenebilir doğal kaynakların katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi, üretim süreçlerinin geliştirilmesi ve teknolojik yeniliklerin endüstriyel uygulamalara kazandırılması açısından önemli bir bilim ve uygulama alanıdır. Günümüzde sürdürülebilir hammadde kullanımı, üretimde verimlilik, ürün kalitesi ve dijitalleşme gibi gelişmeler, orman endüstrisinde yeni araştırma ve uygulama alanlarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, teknolojik gelişmelerin yanı sıra insan kaynaklarının etkin yönetimi ve çalışma koşullarının iyileştirilmesi de sektörün gelişiminde önemli bir yer tutmaktadır. Bu doğrultuda, orman endüstrisinin teknik, üretimsel ve yönetsel boyutlarının birlikte değerlendirilmesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. "Orman Endüstrisinde Teknoloji, Üretim ve Yönetim Yaklaşımları" başlıklı bu eser, Orman Endüstri Mühendisliği alanındaki güncel araştırmaları ve farklı disiplinlerden beslenen bilimsel yaklaşımları bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Kitap kapsamında, orman endüstri mühendislerinin iş stresi düzeyleri ile problem çözme becerileri arasındaki ilişkiler, farklı ağaç türlerinden elde edilen odun sirkelerinin fizikokimyasal özellikleri ve ısıl işlem uygulamalarının ahşap malzemelerde küf mantarı gelişimi üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Ayrıca, hızlı büyüyen ağaç türlerinin çapraz lamine kereste (CLT) üretiminde kullanım olanakları ile ahşap ve ahşap esaslı malzemelerin CNC ile işlenmesinde yüzey kalitesinin tahmini ve optimizasyonuna yönelik yapay zekâ ve modelleme yaklaşımları değerlendirilmiştir. Bu

çalışmalar, bir yandan ahşap hammaddesinin değerlendirilmesi, malzeme performansının iyileştirilmesi ve üretim teknolojilerinin geliştirilmesine odaklanırken, diğer yandan çalışma yaşamında insan faktörünün önemini ortaya koymaktadır. Bu yönüyle kitap, orman endüstrisinde malzeme, teknoloji, üretim ve yönetim konularını bir araya getirerek alanın farklı araştırma konularına ilişkin çok yönlü bir bakış açısı sunmaktadır. Bu eserin, orman endüstri mühendisliği alanında çalışan araştırmacılar, akademisyenler, lisansüstü öğrenciler ve sektör temsilcileri için yararlı bir kaynak olmasını temenni ediyor; kitabın hazırlanmasına katkı sağlayan tüm bölüm yazarlarına teşekkürlerimi sunuyorum.

EDİTÖR

Doç. Dr. Hurem DUTAL

Ekim 2026

İÇİNDEKİLER

HIZLI BÜYÜYEN AĞAÇ TÜRLERİNİN ÇAPRAZ LAMİNE KERESTE (CLT) ÜRETİMİNDE KULLANIMI 1

HASAN ÖZTÜRK, OKAN İLHAN, AYDIN DEMİR

AHŞAP VE AHŞAP ESASLI MALZEMELERİN CNC İŞLENMESİNDE YÜZEY KALİTESİNİN TAHMİNİ VE OPTİMİZASYONU: YAPAY ZEKÂ VE MODELLEME YAKLAŞIMLARI 39

HASAN ÖZTÜRK, ABDULLAH UĞUR BİRİNCİ, AYDIN DEMİR

FARKLI ODUN SİRKELERİNİN BAZI FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ 78

BERKAY SEVİCİ, MUHAMMET KARAŞAHİN

ISIL İŞLEMİN ÇEŞİTLİ AĞAÇ TÜRLERİNDE KÜF MANTARI GELİŞİMİNE ETKİSİ 95

AYHAN AYTİN, COŞKUN KÖSE, CİHAT TAŞÇIOĞLU

BÖLÜM 1

HIZLI BÜYÜYEN AĞAÇ TÜRLERİNİN ÇAPRAZ LAMİNE KERESTE (CLT) ÜRETİMİNDE KULLANIMI

HASAN ÖZTÜRK[1]
OKAN İLHAN[2]
AYDIN DEMİR[3]

Giriş

İnşaat sektörü, küresel enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları içinde en büyük paya sahip sektörlerden biridir. Bu nedenle yapı malzemelerinin üretiminden kullanım ömrünün sonuna kadar oluşturduğu çevresel yük, iklim politikalarının merkezinde yer almaktadır. Beton ve çelik gibi enerji yoğun malzemelere alternatif olarak öne çıkan kütle ahşap (mass timber) ürünleri, yenilenebilir bir hammaddeden üretilmeleri, kullanım süreleri boyunca karbonu

[1] Doçent Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Arsin Meslek Yüksek Okulu, Ormancılık Bölümü, Ormancılık ve Orman Ürünleri Programı, Orcid: 0000-0002-5422-7556
[2] Öğretim Görevlisi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü, Mobilya ve Dekorasyon Programı, Orcid: 0000-0001-8882-6461
[3] Doçent Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Odun Mekaniği ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0003-4060-2578

depolamaları ve prefabrikasyona uygun yapıları sayesinde son yirmi yılda giderek artan bir ilgi görmektedir (Duan, Huang & Zhang, 2022: 1; Younis & Dodoo, 2022: 1). Bu ürün ailesi içinde çapraz lamine kereste (Cross-Laminated Timber, CLT), çok katlı ahşap binaların yaygınlaşmasını mümkün kılan temel yapı elemanı hâline gelmiştir.

CLT, kerestelerin birbirine dik açılarla katmanlar hâlinde yapıştırılmasıyla üretilen ve hem düzlem içi hem de düzlem dışı yükleri taşıyabilen masif bir ahşap paneldir. Ürün 1990'lı yıllarda Avusturya ve Almanya'da geliştirilmiş, 2000'li yıllarda Avrupa'da ticari olgunluğa ulaşmış ve ardından Kuzey Amerika, Okyanusya ve Asya'ya yayılmıştır (Brandner & ark., 2016: 331). 2014 yılında dünya CLT üretiminin yaklaşık %90'ı Avrupa'da gerçekleşmiş ve üretim hacmi yaklaşık 560.000 m³ düzeyinde kalmıştır (UNECE/FAO, 2015). Sonraki yıllarda kapasite hızla artmış ve 2020 yılı için küresel üretim kapasitesinin yaklaşık 2,8 milyon m³ olduğu tahmin edilmiştir (Altaher Omer Ahmed & ark., 2023: 1; UNECE/FAO, 2020).

CLT endüstrisi, gelişimi boyunca büyük ölçüde sınırlı sayıda iğne yapraklı türe dayanmıştır. Avrupa'da Norveç ladini (*Picea abies*) ve göknar, Kuzey Amerika'da ise ladin-çam-göknar (SPF) grubu, Douglas göknarı ve güney sarı çamı standart hammaddeler olarak kullanılmaktadır (Brandner & ark., 2016: 331; Gagnon & Pirvu, 2011). Ancak iklim değişikliğine bağlı kuraklık dönemleri, kabuk böceği salgınları ve kereste fiyatlarındaki dalgalanmalar, bu türlere dayalı tedarik zincirinin kırılganlığını açıkça ortaya koymuştur (Hlásny & ark., 2021: 1; Netherer & ark., 2019: 1). Bu gelişmeler, CLT üreticilerini ve araştırmacıları hammadde tabanını çeşitlendirmeye, özellikle de kısa rotasyonla yetiştirilen ve plantasyon ormancılığına konu olan hızlı büyüyen ağaç türlerini değerlendirmeye yöneltmiştir (Corpataux, Okuda & Kua, 2020: 1; Espinoza & Buehlmann, 2018: 1).

Hızlı büyüyen türler; kavak (*Populus* spp.), okaliptüs (*Eucalyptus* spp.), radiata çamı (*Pinus radiata*), Çin köknarı (*Cunninghamia lanceolata*), Japon sediri (*Cryptomeria japonica*) ve tropikal plantasyon türleri gibi farklı coğrafyalarda yaygın olarak yetiştirilen ve kısa sürede hasat edilebilen türleri kapsamaktadır. Bu türlerin düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir hammadde kaynağı sunma potansiyeli yüksektir. Buna karşın düşük yoğunluk, yüksek genç odun oranı, mekanik özelliklerdeki geniş değişkenlik ve mevcut standartların bu türleri yeterince kapsamaması, CLT üretiminde kullanımlarını sınırlayan başlıca etkenlerdir (Kramer, Barbosa & Sinha, 2014: 1; Z. Wang & ark., 2018: 227).

Bu bölümün amacı, hızlı büyüyen ağaç türlerinin CLT üretiminde kullanımına ilişkin uluslararası literatürü derlemek, türlere göre elde edilen deneysel bulguları karşılaştırmalı olarak değerlendirmek, karşılaşılan teknik sınırları ve bu sınırları aşmaya yönelik çözüm yaklaşımlarını ortaya koymaktır. Bölümde ayrıca Türkiye'de CLT üzerine yürütülen çalışmalar gözden geçirilmekte ve ülkenin hızlı büyüyen tür kaynaklarının CLT üretiminde değerlendirilmesine yönelik bir araştırma gündemi önerilmektedir.

Çapraz Lamine Kerestenin Tanımı, Üretimi ve Standartları

CLT paneller genellikle üç, beş veya yedi gibi tek sayıda katmandan oluşur. Dış katmanlardaki lameller panelin ana taşıma doğrultusuna paralel, iç katmanlardaki lameller ise bu doğrultuya dik yerleştirilir. Bu çapraz düzen, ahşabın lif yönüne bağlı olarak değişen şişme ve büzülme davranışını büyük ölçüde sınırlayarak panele yüksek boyutsal kararlılık kazandırır. Aynı zamanda panelin iki doğrultuda yük taşıyabilmesini sağlayarak döşeme, duvar ve çatı elemanı olarak kullanılmasına olanak tanır (Brandner & ark., 2016: 331; Harris, 2015: 141).

CLT üretim süreci; lamel hazırlama ve kurutma, mukavemet sınıflandırması, parmak birleştirme, planyalama, katman oluşturma,

yapıştırıcı uygulama ve presleme aşamalarından oluşur. Lameller genellikle %12 ± 2 nem düzeyine kurutulur ve görsel ya da makine sınıflandırmasına tabi tutulur (FPInnovations, 2013). Avrupa uygulamasında lameller çoğunlukla EN 338 standardındaki C24 sınıfı veya çekme dayanımına göre tanımlanan T14 sınıfı olarak seçilir (CEN, 2016; CEN, 2021). Uzunlamasına birleştirme parmak birleştirme ile yapılır; parmak birleştirme ve yüzey yapıştırma gereklilikleri EN 14080 ve EN 16351 standartlarında tanımlanmıştır (CEN, 2013; CEN, 2021).

CLT üretiminde yapısal sınıf yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Avrupa'da tek bileşenli poliüretan (1C-PUR) yapıştırıcılar baskın konumdadır; bunun yanında melamin-üre-formaldehit (MUF) ve fenol-rezorsinol-formaldehit (PRF) yapıştırıcılar da yaygın olarak kullanılmaktadır. Kuzey Amerika'da ise emülsiyon polimer izosiyanat (EPI) sistemleri de tercih edilmektedir (Brandner & ark., 2016: 331; FPInnovations, 2013). Presleme basıncı tür yoğunluğuna ve yapıştırıcı tipine göre değişmektedir. Düşük yoğunluklu iğne yapraklılarda yaklaşık 0,6 N/mm² yeterli olabilirken, yoğun yapraklı türlerde 1,0-1,5 N/mm² gibi daha yüksek basınçlar gerekmektedir (Dugmore & ark., 2019: 217; Mohd Yusof & ark., 2019: 1).

CLT'ye ilişkin başlıca ürün standartları Avrupa'da EN 16351, Kuzey Amerika'da ANSI/APA PRG 320 ve uluslararası düzeyde ISO 16696-1'dir (ANSI/APA, 2019; CEN, 2021; ISO, 2019). Lamellerin mukavemet sınıfları EN 338'e, mekanik test yöntemleri EN 408'e, yapısal tasarım ise Eurocode 5 (EN 1995-1-1) esaslarına dayanmaktadır (CEN, 2004a; CEN, 2012; CEN, 2016). Bu standartların önemli bir ortak özelliği, büyük ölçüde iğne yapraklı türlere göre kurgulanmış olmalarıdır. Nitekim PRG 320 standardı lamel malzemesi olarak LVL ve OSL gibi mühendislik ürünlerine izin verirken yapraklı türleri kapsamamaktadır. Bu durum, hızlı büyüyen yapraklı türlerden üretilen CLT'nin pazara girişinde

kurumsal bir engel oluşturmaktadır (ANSI/APA, 2019; Espinoza & Buehlmann, 2018: 1).

CLT'nin yapısal davranışında en kritik özelliklerden biri yuvarlanma kayma (rolling shear) dayanımıdır. Panel düzlem dışı yüklendiğinde enine katmanlarda, lif doğrultusuna dik düzlemde oluşan kayma gerilmeleri lifleri birbiri üzerinde yuvarlanmaya zorlar. Ahşabın bu yöndeki kayma dayanımı ve modülü oldukça düşüktür. Bu nedenle özellikle kısa açıklıklı ve yoğun yüklü uygulamalarda tasarımı çoğunlukla yuvarlanma kayma belirlemektedir (Ehrhart & Brandner, 2018: 554). PRG 320 standardı SPF türlerinden üretilen CLT için karakteristik yuvarlanma kayma dayanımını 0,5 MPa olarak kabul ederken, Avrupa'da iğne yapraklı CLT için yaklaşık 1,1 MPa değeri önerilmektedir (Z. Wang & ark., 2018: 227). Aşağıda görüleceği gibi, hızlı büyüyen türlerin bu özellik bakımından iğne yapraklılara karşı önemli bir avantajı bulunmaktadır.

Standart Türlere Dayalı Hammadde Arzında Yaşanan Sorunlar

Avrupa CLT endüstrisinin ana hammaddesi olan Norveç ladini, iklim değişikliğine karşı en hassas türlerden biridir. Sığ kök sistemi ve kuraklığa düşük toleransı, ladin meşcerelerini rüzgâr devrikleri ve kabuk böceği (*Ips typographus*) salgınları karşısında kırılgan hâle getirmektedir. Netherer & ark., (2019: 1), Avusturya Federal Ormanlarında kabuk böceği zararının 2015 yılından itibaren belirgin biçimde arttığını, aynı yıl ladin meşcerelerinin %12,7'sinin etkilendiğini ve akut kuraklığın bu salgınların temel sürükleyicilerinden biri olduğunu ortaya koymuştur.

Benzer bir tablo Orta Avrupa'nın diğer ülkelerinde de gözlenmektedir. Çekya'da kabuk böcekleri 2003-2016 döneminde her yıl ladin dikili ağaç servetinin %0,2-1,4'ünü tahrip etmiştir (Hlásny & ark., 2021: 1). 2018 yılında ülkedeki toplam odun üretimi 23,01 milyon m³'e ulaşmış, bunun 13,06 milyon m³'ünü kabuk

böceği kaynaklı zorunlu kesimler oluşturmuştur. Bu miktar bir önceki yıla göre %123'lük bir artışa ve olağan yıllık kabuk böceği kesimlerinin yaklaşık yirmi katına karşılık gelmektedir. Zorunlu kesimler 2020 yılında 34,49 milyon m³ ile en yüksek düzeye ulaşmıştır (Šafařík & ark., 2022: 423). İsviçre'de yapılan çalışmalar ise zorunlu kesimlerin ve sanitasyon kesimlerinin yeni enfeksiyon odaklarının oluşumunu azalttığını göstermiştir (Stadelmann & ark., 2013: 273). Kısa vadede bu tür afetler piyasaya büyük miktarda ve düşük fiyatlı odun sürmektedir. Ancak orta ve uzun vadede ladin stoklarının daralması ve mavi renklenme gibi kalite kayıpları, CLT'nin standart hammaddesinin sürekliliğini ve fiyat istikrarını tehdit etmektedir.

Hammadde baskısı yalnızca Avrupa'ya özgü değildir. Avustralya'da lif üretimi amacıyla yönetilen *Eucalyptus nitens* plantasyonları geniş bir kaynak oluşturmakta, ancak bu kaynağın önemli bir bölümünün düşük katma değerli kağıt hamuru üretimine yönlendirildiği belirtilmektedir (Ettelaei, Taoum & Nolan, 2022: 1; Pangh & ark., 2019: 535). Çin'de ithal kereste bağımlılığını azaltmak amacıyla Çin köknarı, kavak ve okaliptüs gibi yerli plantasyon türlerinin CLT'de değerlendirilmesi öncelikli araştırma alanları arasına girmiştir (Liao & ark., 2017: 508; Yin & ark., 2024: 1). Güneydoğu Asya'da sengon (*Falcataria moluccana*), jabon (*Anthocephalus* spp.) ve akasya (*Acacia mangium*) gibi tropikal plantasyon türleri öne çıkmaktadır (Corpataux, Okuda & Kua, 2020: 1). Kuzey Amerika'da ise az değerlendirilen yapraklı türlerin CLT'ye kazandırılması gündemdedir (Espinoza & Buehlmann, 2018: 1; Ogunruku & ark., 2024: 233). Bu eğilimlerin ortak paydası, CLT hammadde tabanının coğrafi olarak erişilebilir, ekonomik ve yenilenebilir kaynaklara doğru genişletilmesidir.

Hızlı Büyüyen Türlerin Odun Özellikleri ve CLT Açısından Önemi

Hızlı büyüyen türler genellikle kısa idare süreleriyle (çoğunlukla 10-30 yıl) yetiştirilen, yüksek hacim artımına sahip türlerdir. Bu türlerin odunu, uzun idare süreli doğal orman ağaçlarına kıyasla daha yüksek oranda genç odun içerir. Ayrıca çoğu zaman daha düşük yoğunluğa, daha düşük elastikiyet modülüne ve daha geniş özellik değişkenliğine sahiptir. Kısa rotasyonlu ve küçük çaplı tomruklardan elde edilen lamellerde öz ve özün yakın çevresindeki odun daha sık görülür; bu durum mekanik performansı doğrudan etkilemektedir (Liao & ark., 2017: 508; Z. Wang & ark., 2018: 227).

CLT'nin katmanlı yapısı ise bu türler açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Panelin eğilme rijitliği büyük ölçüde dış boyuna katmanlar tarafından belirlenirken, enine katmanlar esas olarak kayma kuvvetlerini aktarır. Bu iş bölümü, farklı mekanik özelliklere sahip türlerin aynı panel içinde amaca uygun olarak konumlandırılmasına olanak tanır. Böylece düşük rijitlikli ancak yuvarlanma kayma bakımından üstün türler enine katmanlarda, yüksek elastikiyet modülüne sahip türler ise dış katmanlarda değerlendirilebilir (Altaher Omer Ahmed & ark., 2023: 1; Ehrhart & Brandner, 2018: 554). Hızlı büyüyen türlerle yapılan araştırmaların önemli bir bölümü, bu katman düzenlemesine dayalı hibrit CLT kavramı üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Kavak (Populus spp.) ile Üretilen CLT

Kavak, ılıman kuşakta en yaygın yetiştirilen hızlı büyüyen türlerden biridir ve CLT literatüründe en kapsamlı incelenen yapraklı türdür. Kramer, Barbosa & Sinha, (2014: 1), ABD'de FSC sertifikalı plantasyonlardan elde edilen hibrit kavak (özgül ağırlık ≈ 0,34-0,35) lamellerle PRF yapıştırıcı kullanarak üç katmanlı CLT paneller üretmiştir. Çalışmada panellerin PRG 320 standardının E3 sınıfı için öngörülen eğilme ve kayma dayanımı ölçütlerini karşıladığı, ancak

elastikiyet modülü ölçütünü karşılayamadığı belirlenmiştir. Araştırmacılar bu sonuca dayanarak kavağın daha rijit türlerle birlikte hibrit düzenlerde kullanılmasını önermiştir. Bu bulgu, hızlı büyüyen türlerle yapılan sonraki çalışmaların temel tezini de özetlemektedir: bu türlerde dayanım çoğunlukla yeterli, rijitlik ise sınırlayıcıdır.

Z. Wang & ark., (2018: 227), Çin'de yetiştirilen hızlı büyüyen kavak (*Populus tomentosa*) lamellerinin yuvarlanma kayma özelliklerini EN 408'e göre incelemiştir. Çalışmada yuvarlanma kayma modülü 177 MPa, karakteristik yuvarlanma kayma dayanımı ise 2,24 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, PRG 320'de SPF için kabul edilen 0,5 MPa ve Avrupa'da iğne yapraklılar için önerilen 1,1 MPa değerlerinin oldukça üzerindedir. Aynı çalışmada lamel içinde öz bulunmasının yuvarlanma kayma özelliklerini anlamlı biçimde düşürdüğü ve özden uzaklaştıkça bu özelliklerin arttığı saptanmıştır. Bu bulgu, kısa rotasyonlu plantasyonlarda genç odun ve öz etkisinin kalite kontrolde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

İran'da yürütülen bir dizi çalışmada kavak CLT'nin eğilme ve kayma davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Hematabadi & ark., (2020: 1), plantasyon kökenli ak kavaktan (*Populus alba*) üretilen CLT panellerde ana eksende baskın kırılma modlarının yuvarlanma kayma ve delaminasyon olduğunu belirlemiştir. Araştırmacılar açıklık/kalınlık oranının eğilme dayanımı (MOR) ve elastikiyet modülü (MOE) ile doğru orantılı olduğunu ve kayma analojisi ile sonlu elemanlar yöntemi tahminlerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermiştir. Aynı ekibin sonraki çalışmasında, kavak dış katmanlar ile Doğu kayını (*Fagus orientalis*) enine katmanlardan oluşan hibrit CLT'nin tüm açıklık oranlarında ve her iki eksende saf kavak CLT'den üstün performans gösterdiği bulunmuştur (Hematabadi & ark., 2021: 1). Rostampour Haftkhani & Hematabadi, (2022: 1) ise *Populus deltoides* CLT'de katman açılarının (0°/90°/0° ve 0°/45°/0° gibi) eğilme davranışını belirleyici

biçimde etkilediğini ve 45° katmanların kırılma modunu boyuna kaymaya doğru değiştirdiğini ortaya koymuştur.

Avrupa'da Altaher Omer Ahmed & ark., (2023: 1), Macaristan kökenli kavak, kayın ve ladin lamellerle farklı tür kombinasyonlarında hibrit CLT paneller üretmiştir. Çalışmada kavağın (yoğunluk ≈ 496 kg/m³) MOE ve MOR değerlerinin yüksek sınıflı ticari iğne yapraklı CLT'ye ulaştığı veya onu aştığı belirlenmiştir. Kayın-kavak-kayın düzenindeki panellerde MOE 15.700 MPa, MOR ise 108,73 MPa olarak ölçülmüştür. Buna karşın kayın-ladin hibritleri beklenenin belirgin biçimde altında kalmıştır. Araştırmacılar ortalama panel yoğunluğunun eğilme performansının en iyi tek tahmin edicisi olduğunu vurgulamıştır. Aynı araştırma grubunun daha önceki çalışması da Macar hammaddelerinden CLT üretiminin teknik olarak uygulanabilir olduğunu göstermiştir (Markó, Bejó & Takáts, 2016: 1).

Yapışma performansı açısından da kavak olumlu sonuçlar vermektedir. Das & ark., (2023: 1), kara kavak (*Populus nigra*) ve akçaağaçtan (*Acer platanoides*) üretilen karma CLT'de blok kayma dayanımının 10,7-10,9 N/mm² aralığında olduğunu, tek türlü CLT'de ise bu değerin 4,8-5,4 N/mm² aralığında kaldığını bildirmiştir. Çalışmada hem 1C-PUR hem de melamin yapıştırıcı ile ladine göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Aynı ekibin sonraki çalışmasında kavak CLT'nin (yoğunluk ≈ 398 kg/m³) 1C-PUR ile 2,12 N/mm² yuvarlanma kayma dayanımına ulaştığı ve ladin CLT'ye eşit ya da daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Dış katmanlarda akçaağaç kullanımı ise global eğilme modülünü %74, eğilme dayanımını %37 ve yuvarlanma kayma dayanımını %48 artırmıştır (Das & ark., 2025: 1).

Kavak CLT'nin bağlantı elemanı ve sistem düzeyindeki performansına ilişkin bulgular da umut vericidir. Abdoli & ark., (2022: 1), ak kavak ve göknardan (*Abies alba*) üretilen CLT'de dokuz farklı çivi ve vidanın çekme direncini karşılaştırmış ve kavağın

bağlantı elemanı tutma performansı bakımından CLT için uygun olduğunu göstermiştir. Shi & ark., (2022: 1212) ise hızlı büyüyen kavaktan üretilen CLT perde duvarların yanal yük altındaki davranışını deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışma, kavak CLT'nin taşıyıcı sistem düzeyinde test edildiği sınırlı sayıdaki araştırmadan biridir. Bu noktada botanik olarak farklı bir cins olan sarı kavağın (*Liriodendron tulipifera*) da ayrıca anılması gerekir. Sarı kavaktan üretilen CLT'nin kayma dayanımının güney çamından ve hibrit kavak CLT'den daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Mohamadzadeh & Hindman, 2015). Ayrıca düşük kaliteli sarı kavak kerestesinin CLT hammaddesi olarak kullanılabileceği gösterilmiştir (da Rosa Azambuja, DeVallance & McNeel, 2022: 1).

Okaliptüs (Eucalyptus spp.) ile Üretilen CLT

Okaliptüs, tropikal ve subtropikal bölgelerde en geniş plantasyon alanına sahip cinslerden biridir ve yüksek yoğunluğu nedeniyle CLT için dikkat çekici bir adaydır. Liao & ark., (2017: 508), Çin'de kısa rotasyonla yetiştirilen küçük çaplı *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* kerestelerinden üç katmanlı CLT üretmiş ve panellerin eğilme performansının ticari iğne yapraklı CLT ile eşdeğer olduğunu bildirmiştir. Çalışmada ana ve ikincil doğrultuda enine kayma modülleri sırasıyla 91,8 MPa ve 241,6 MPa, katmanlar arası kayma dayanımları ise 1,3 MPa ve 0,5 MPa olarak belirlenmiştir. Epoksi (EP), EPI, PRF ve PUR yapıştırıcılarla üretilen panellerin tümü PRG 320 standardının yapışma ve mekanik gerekliliklerini karşılamış, en düşük delaminasyon oranı (%7,6) PUR ile elde edilmiştir. Hidroksimetil rezorsinol (HMR) astar uygulamasının ise yapışma performansını ve mekanik özellikleri genel olarak iyileştirdiği saptanmıştır.

Avustralya'da lif üretimi amacıyla yönetilen okaliptüs plantasyonlarının yapısal amaçlı değerlendirilmesi kapsamlı bir araştırma programına konu olmuştur. Pangh & ark., (2019: 535),

Eucalyptus nitens ve *E. globulus* plantasyonlarından elde edilen lamellerle CLT üretmiş ve lamel sınıfının panelin MOE ve MOR değerlerini belirgin biçimde etkilediğini göstermiştir. Ettelaei, Taoum & Nolan, (2022: 1), *E. nitens* CLT'de düzlemsel kayma testiyle maksimum yuvarlanma kayma dayanımını lamel sınıfı düzenine bağlı olarak 2,8-3,4 MPa aralığında belirlemiştir. Bu değerler radiata çamı ve ladin için raporlanan değerlerin üzerindedir. Çalışmada yüksek sınıflı lamellerin dış katmanlarda kullanılmasının yuvarlanma kayma dayanımını, enine katmanda kullanılmasının ise yuvarlanma kayma modülünü artırdığı saptanmıştır.

Nero, Christopher & Ngo, (2022: 1), 138 deneyden oluşan karşılaştırmalı bir çalışmada yük yıllık halkalara paralel uygulandığında yuvarlanma kayma dayanımını *E. nitens* için 4,1 MPa, radiata çamı için 2,7 MPa ve Norveç ladini için 1,7 MPa olarak belirlemiştir. Yük halkalara dik uygulandığında ise bu değerler sırasıyla yaklaşık %16, %40 ve %52 oranında azalmıştır. Bu sonuç, yüksek yoğunluklu plantasyon okaliptüsünün enine katman malzemesi olarak iğne yapraklılara kıyasla belirgin bir üstünlüğe sahip olduğunu ve halka yöneliminin yuvarlanma kayma üzerinde güçlü bir etkisi bulunduğunu göstermektedir.

Okaliptüsün yüksek yoğunluğu ve ekstraktif içeriği yapıştırma sürecinde özel önlemler gerektirmektedir. Dugmore & ark., (2019: 217), *Eucalyptus grandis* CLT panellerde 0,7 MPa presleme basıncıyla ve gerilme boşaltma kanalları açılmadan yapısal kalitede yüzey yapışması elde edilebildiğini göstermiştir. Kağıt hamuru ve yonga üretimi amacıyla, budama ve aralama yapılmadan işletilen plantasyonlardan elde edilen *E. nitens* ile üretilen CLT'nin uzun süreli davranışı da incelenmiştir. Kontrollü ortamda yürütülen pilot çalışmada bu panellerin C24 sınıfı ladin CLT'ye kıyasla daha yüksek kullanılabilirlik yükü kapasitesine ve daha düşük sünme oranına sahip olduğu belirlenmiştir (Liang & ark., 2024: 1637). Aynı

panellerin sünme davranışı daha sonra kontrolsüz çevre koşullarında da değerlendirilmiştir (Liang & ark., 2025: 1).

Plantasyon Çamları ve Sitka Ladini ile Üretilen CLT

Radiata çamı, Yeni Zelanda, Avustralya ve Şili'de plantasyon ormancılığının temel türüdür ve Okyanusya CLT endüstrisinin ana hammaddesidir. M. Li, (2017: 331), Yeni Zelanda radiata çamında lamel kalınlığının yuvarlanma kayma dayanımını anlamlı biçimde etkilediğini, kısa açıklıklı eğilme ve modifiye düzlemsel kayma testlerinin ise karşılaştırılabilir sonuçlar verdiğini göstermiştir. Navaratnam & ark., (2020: 1), Avustralya radiata çamından (özgül ağırlık ≈ 0,48) üretilen CLT'de yuvarlanma kayma dayanımını 1,55-2,18 MPa aralığında belirlemiş ve lamel MOE'sinin kayma dayanımı üzerinde etkili olduğunu bildirmiştir. X. Li & ark., (2021: 423) ise Avustralya radiata CLT'sinde karakteristik yuvarlanma kayma dayanımını 2,0 MPa, yuvarlanma kayma modülünü 65,5 MPa olarak hesaplamıştır.

ABD'nin güneydoğusunda yaygın plantasyonları bulunan güney sarı çamı da CLT için değerlendirilmiştir. Hindman & Bouldin, (2015: 1), güney sarı çamından üretilen CLT'nin eğilme ve kayma değerlerinin PRG 320'deki ilgili sınıf değerlerini aştığını bildirmiştir. Az değerlendirilen yapraklı türler üzerine yapılan güncel bir çalışmada ise güney sarı çamından üretilen endüstriyel CLT matlarının yoğunluğu 616 kg/m³ olarak belirlenmiş ve yaklaşık 770 kg/m³ yoğunluğa sahip kırmızı meşe alternatif bir hammadde olarak önerilmiştir (Ogunruku & ark., 2024: 233).

İrlanda ve Birleşik Krallık'ta hızlı büyüyen ve düşük yoğunluklu Sitka ladini (*Picea sitchensis*), yerli CLT üretimi için temel kaynak olarak görülmektedir. Sikora, McPolin & Harte, (2016: 141), C16 sınıfı İrlanda Sitka ladini lamellerden PUR ile üretilen CLT panellerde yuvarlanma kayma dayanımının 1,0-2,0 N/mm² aralığında olduğunu ve panel kalınlığı arttıkça hem eğilme hem de

yuvarlanma kayma dayanımının azaldığını göstermiştir. Bu bulgu, düşük sınıflı iğne yapraklı lamellerin bile uygun tasarımla CLT'de kullanılabileceğini, ancak kalınlık etkisinin tasarımda dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Japon Sediri ve Çin Köknarı ile Üretilen CLT

Japonya'da geniş plantasyon alanlarına sahip Japon sediri (sugi), ülkenin CLT standardının ve üretiminin temel türüdür. Ukyo, Shindo & Miyatake, (2019: 1), sugi lamellerinde 62 mm genişlikte ortalama yuvarlanma kayma dayanımını 1,54 MPa olarak belirlemiş ve yıllık halka deseni ile lamel geometrisinin bu özellik üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Ukyo & ark., (2021: 1) ise dış katmanlarda daha rijit hinoki servisi (*Chamaecyparis obtusa*), iç katmanlarda sugi kullanılan hibrit CLT'de enine katmanın yuvarlanma kayma dayanımını 1,48 MPa, yuvarlanma kayma modülünü ise yaklaşık 81,3 MPa olarak hesaplamıştır.

Çin'in güneyinde en yaygın plantasyon türü olan Çin köknarı, düşük yoğunluğu ve düşük rijitliği nedeniyle CLT araştırmalarında hibrit ve optimizasyon yaklaşımlarının sıklıkla denendiği bir türdür. Yin & ark., (2024: 1), hızlı büyüyen Çin köknarı ile OSB'nin birlikte kullanıldığı hibrit CLT'de vida gömülme davranışını karakterize etmiştir. Zhang & ark., (2025: 1) ise yapıştırıcı kullanılmadan, ahşap dübellerle birleştirilen Çin köknarı CLT panellerin eğilme performansını incelemiş ve yapıştırıcısız üretimin bu tür için uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. X. Wang & ark., (2018: 7002) ise toplam kalınlığı 95 mm'de sabit tutulan Çin köknarı CLT'de lamel kalınlığı arttıkça eğilme rijitliğinin arttığını, kayma performansının ise azaldığını belirlemiştir. Aynı çalışmada boyuna katmanların kalınlaştırılıp enine katmanların inceltilmesinin, belirli bir oran aralığında ve ek ahşap kullanılmadan, hem eğilme hem de kayma performansını iyileştirdiği gösterilmiştir.

Tropikal Hızlı Büyüyen Türler ile Üretilen CLT

Güneydoğu Asya'da yaygın olarak yetiştirilen tropikal plantasyon türleri, bölgede yerli CLT üretimi için önemli bir potansiyel taşımaktadır. Corpataux, Okuda & Kua, (2020: 1), sengon, jabon ve akasya türlerinden üretilen CLT panellerin panel ve plak özelliklerini Eurocode 5 ile uyumlu biçimde belirlemiştir. Düşük yoğunluklu türlerin rijitlik bakımından sınırlı kaldığı başka çalışmalarla da ortaya konmuştur. Hendrik & ark., (2016: 5949), sengon (0,31 g/cm³) ve jabondan (0,44 g/cm³) üretilen beş katmanlı lamine panellerin hiçbirinin MOE ve kayma dayanımı ölçütlerini karşılayamadığını, yalnızca MDI ile yapıştırılan sengon panellerin eğilme dayanımı ölçütünü sağladığını bildirmiştir.

Acacia mangium üzerine yapılan çalışmalar, yoğun tropikal türlerde yapıştırıcı seçiminin ve presleme koşullarının belirleyici olduğunu göstermektedir. Mohd Yusof & ark., (2019: 1), *A. mangium* CLT'de PRF yapıştırıcının PUR'a kıyasla daha yüksek kayma dayanımı, odun kırılma yüzdesi ve mekanik özellikler sağladığını bildirmiştir. Aynı çalışmada yoğun odun yapısı nedeniyle yaklaşık 1,5 N/mm² presleme basıncının gerekli olduğu belirtilmiştir. Malezya'da Mohamad Bhkari & ark., (2022: 2851), Laran (*Neolamarckia cadamba*) ve Batai (*Paraserianthes falcataria*, sengon) türlerinden üç ve beş katmanlı CLT üretmiştir. Laran panellerin yoğunluğa bağlı olarak daha yüksek MOR ve MOE değerlerine ulaştığı, ancak her iki türün de CL24 sınıfının rijitlik hedefinin altında kaldığı belirlenmiştir.

Tropikal türlerle yapılan çalışmalar, biyo-bazlı yapıştırıcıların CLT'de kullanımına ilişkin önemli veriler de sunmaktadır. Trisatya & ark., (2023: 81), tanen-rezorsinol-formaldehit yapıştırıcı ile sengon, jabon ve hindistan cevizi ağacından altı katmanlı CLT paneller üretmiştir. Panellerin formaldehit emisyonunun 0,001–0,003 mg/L aralığında kaldığı ve Japon tarım standardı JAS 1152'nin gerekliliklerini karşıladığı

belirlenmiştir. Bu sonuç, hızlı büyüyen türlerin düşük çevresel etkili yapıştırıcı sistemleriyle birlikte değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Huş, Paulownia ve Bambu ile Üretilen Paneller

Kuzey ve Doğu Avrupa'da geniş kaynaklara sahip huş (*Betula* spp.), CLT pazarında ticari ürünlerle temsil edilmeye başlanan ilk yapraklı türlerden biridir. Ehrhart & Brandner, (2018: 554), huşun yanı sıra kayın, dişbudak ve titrek kavağın (*Populus tremula*) yuvarlanma kayma özelliklerinin ladinden yüksek olduğunu ve bu farkın kayın ile dişbudakta yaklaşık üç kata ulaştığını göstermiştir. Ticari ölçekte üretilen huş CLT için üretici, karakteristik eğilme dayanımını 38 N/mm², ortalama elastikiyet modülünü 15.000 N/mm² ve karakteristik yuvarlanma kayma dayanımını 1,8 N/mm² olarak beyan etmektedir. Huşun yüksek mekanik özellikleri sayesinde bir pilot konut uygulamasında CLT hacminde yaklaşık %15 tasarruf sağlandığı bildirilmektedir (HASSLACHER Group, t.y.). Huş CLT'ye ilişkin bağımsız hakemli veriler ise henüz sınırlıdır.

Dünyanın en hızlı büyüyen ağaç türleri arasında gösterilen paulownia (*Paulownia* spp.), çok düşük yoğunluğu (çoğunlukla 300 kg/m³'ün altında) nedeniyle yapısal CLT için sınırlı bir potansiyele sahiptir. Barbu & ark., (2022: 1), İspanya, Bulgaristan ve Sırbistan plantasyonlarından elde edilen *Paulownia tomentosa* × *elongata* kerestesini incelemiştir. En yüksek değerlerin elde edildiği İspanya örneklerinde bile ortalama yoğunluk 266 kg/m³, eğilme dayanımı yaklaşık 40 N/mm², eğilmede elastikiyet modülü ise yaklaşık 4.900 N/mm² düzeyinde kalmıştır. Bu rijitlik değeri, EN 338'de C24 sınıfı için öngörülen 11.000 N/mm² ortalama elastikiyet modülünün yarısından azdır (CEN, 2016). Araştırmacılar paulownia odununun hafif uygulamalarda potansiyel taşıdığını ve balsa gibi pahalı tropikal türlerin yerini alabileceğini vurgulamıştır. Bu nedenle

paulownia, CLT içinde ancak hafif çekirdek katmanı veya düşük yük düzeyli uygulamalar için değerlendirilebilecek bir tür olarak görülmektedir. Paulownia, CLT içinde ancak hafif çekirdek katmanı veya düşük yük düzeyli yapı dışı uygulamalar için değerlendirilebilecek bir tür olarak görülmektedir.

Bambu, botanik olarak ağaç olmamakla birlikte en hızlı yenilenen lignoselülozik kaynaklardan biri olarak hibrit çapraz lamine panellerde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Çapraz lamine bambu-ahşap (CLBT) panellerin basınç ve kayma performansında genellikle geleneksel CLT'yi aştığı bildirilmektedir (J. Li & Zhao, 2025: 1). Wen & Xiao, (2023: 1), CLBT ve CLT kirişlerin eğilme davranışını karşılaştırmış ve bambu katmanların eğilme rijitliğini ve taşıma kapasitesini artırdığını göstermiştir. Bu yaklaşım, düşük rijitlikli hızlı büyüyen ahşap türlerinin yüksek modüllü bambu katmanlarla güçlendirilmesine olanak tanıyan bir hibritleştirme stratejisi olarak değerlendirilebilir.

Türkiye'de Yürütülen Çalışmalar

Türkiye'de CLT üzerine yürütülen hakemli çalışmalar son yıllarda artış göstermekle birlikte, ağırlıklı olarak yerli iğne yapraklı türlere odaklanmaktadır. Birinci & ark., (2020: 819), Türkiye'de yetişen çam ve ladin odunlarından üretilen CLT'nin yapısal performansını incelemiştir. Uysal & ark., (2022: 313), Uludağ göknarı (*Abies nordmanniana* subsp. *bornmülleriana*) ve karaçam (*Pinus nigra*) odunlarından polivinil asetat (PVAc) yapıştırıcı ile üç katmanlı CLT üretmiştir. Bu panellerin eğilme dayanımı göknarda 38,4 N/mm², karaçamda 64,6 N/mm²; elastikiyet modülü ise göknarda 5.273,4 N/mm², karaçamda 8.657,0 N/mm² olarak belirlenmiştir. Bu değerler masif odun değerlerinin altında kalmakla birlikte karaçamın her iki formda da daha üstün olduğu görülmüştür. Ancak PVAc'nin EN 16351'de yapısal CLT için öngörülen yapıştırıcılar arasında yer almadığı dikkate alındığında, bu

sonuçların karşılaştırma amaçlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir (CEN, 2021).

Bayramoğlu & ark., (2025: 3519), ladin ve sarıçam (*Pinus sylvestris*) kerestelerinde TS 1265'e göre belirlenen kalite sınıflarının CLT panellerin mekanik özelliklerine ve ürün maliyetine etkisini incelemiştir. Çalışmada karma ve düşük kalite sınıflı lamel düzenlerinin daha düşük maliyetle yapısal gereksinimleri karşılayabildiği gösterilmiştir. Bülbül & ark., (2025: 4720) ise sarıçam, Uludağ göknarı ve meşe lamellerinden PVAc ve PUR yapıştırıcılarla beş katmanlı CLT kirişler üretmiş, ağaç türü, yapıştırıcı tipi ve kiriş gövdesindeki deliklerin taşıma kapasitesine etkisini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Meşe dış katmanlı kirişler en yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır.

Türkiye'de CLT araştırmaları son yıllarda mekanik performansın yanı sıra dayanıklılık konusuna da yönelmiştir. TÜBİTAK tarafından desteklenen bir proje kapsamında, farklı retensiyon düzeylerinde emprenye edilmiş sarıçam lamellerden PUR yapıştırıcıyla üretilen üç katmanlı CLT'nin Trabzon'da altı aylık açık arazi toprak teması koşullarındaki performansı incelenmiştir. Bakır azol (CuAz) ile 7,4, 8,1 ve 9,4 kg/m³ retensiyonda emprenye edilen CLT'de başlangıç eğilme dayanımı kontrol grubunda 22 N/mm² iken, retensiyon arttıkça sırasıyla 18, 16 ve 14 N/mm²'ye düşmüştür. Altı ayın sonunda EN 252'ye göre yapılan görsel değerlendirmede hiçbir örnekte bozunma veya delaminasyon görülmemiş, ancak özellikle toprak altındaki kısımlarda belirgin bakır yıkanması saptanmıştır (Öztürk & ark., 2025: 800). Aynı deneme düzeniyle, disodyum pentaborat dekahidrat esaslı yeni bir borlu koruyucu olan TarımBor ile 4,9, 6,8 ve 9,9 kg/m³ retensiyonda emprenye edilen CLT'de de mekanik özellikler retensiyon arttıkça azalmıştır. Toprak altındaki kısımlarda bor kaybı %72,5–92,4'e ulaşırken, toprak üstündeki kısımlar başlangıç bor içeriğinin %82,1–93,9'unu korumuştur (Demir & ark., 2025: 814). Yazarlar, borlu koruyucuların toprak

temasında kullanımının önerilmediğini ve bu deneme koşullarının en olumsuz senaryoyu temsil ettiğini vurgulamıştır. Her iki çalışmada da tahribatsız (akustik) ve tahribatlı yöntemlerle belirlenen elastikiyet modülleri arasında güçlü ilişkiler (R^2 = 0,59–0,99) elde edilmiştir (Demir & ark., 2025: 814; Öztürk & ark., 2025: 800).

Bununla birlikte, lisansüstü tez düzeyinde bu konuda önemli bir çalışma bulunmaktadır. Öncel, (2022), doktora tezinde ThermoWood yöntemiyle ısıl işlem uygulanmış ve uygulanmamış sarıçam ile Amerikan dişbudağını (*Fraxinus americana*) dış katmanlarda, Samsun kavağını (*Populus deltoides* I-77/51) orta katmanda kullanarak poliüretan yapıştırıcılı üç katmanlı CLT paneller üretmiştir. Her grupta üç örnekle yürütülen dört noktalı eğilme deneylerinde, tamamen kavaktan üretilen panellerin eğilme dayanımı (28,56 N/mm²) sarıçam dış katmanlı ve kavak çekirdekli panellerle (28,5 N/mm²) aynı düzeyde bulunmuş, ancak elastikiyet modülleri (6.229 N/mm²) ANSI/APA PRG 320'nin hiçbir sınıfını karşılayamamıştır. Sarıçam dış katmanlı ve kavak çekirdekli paneller 10.194 N/mm² elastikiyet modülü ile E3 sınıfını sağlarken, orta katmanı 45° açıyla yerleştirilmiş dişbudak–kavak paneller 47,69 N/mm² eğilme dayanımı ve 12.932 N/mm² elastikiyet modülü ile E1 sınıfı koşullarını karşılamıştır. Isıl işlem ise panellerin kalınlık artışını ve ısıl iletkenliğini azaltmakla birlikte eğilme dayanımını ve elastikiyet modülünü düşürmüştür. Bu bulgular, uluslararası literatürle uyumlu olarak yerli kavağın tek başına rijitlik bakımından yetersiz kaldığını, ancak daha rijit türlerle oluşturulan hibrit düzenlerde yapısal sınıflara ulaşabildiğini göstermektedir (Kramer, Barbosa & Sinha, 2014: 1; Öncel, 2022). Ancak bu konunun hakemli yayınlarla ve daha geniş örneklemlerle desteklenmemiş olması, ülkenin hızlı büyüyen tür potansiyeli ile CLT araştırmaları arasında önemli bir boşluk bulunduğunu göstermektedir.

Performans Özelliklerinin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Hızlı büyüyen türlerle yapılan çalışmalardan elde edilen seçilmiş bulgular Tablo 1'de özetlenmiştir. Tablodaki değerler farklı test yöntemleri, lamel boyutları ve yapıştırıcı sistemleriyle elde edildiğinden doğrudan sayısal karşılaştırma yerine eğilimlerin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmalıdır. Nitekim kısa açıklıklı eğilme, düzlemsel kayma ve tek lamel test yöntemleri arasında yuvarlanma kayma değerlerinin önemli ölçüde farklılaşabildiği bildirilmiştir (M. Li, 2017: 331; Nero, Christopher & Ngo, 2022: 1).

Tablo 1. Hızlı Büyüyen Türlerden Üretilen CLT'ye İlişkin Seçilmiş Deneysel Bulgular

Tür / katman düzeni	**İncelenen özellik**	**Temel bulgu**	**Kaynak**
Hibrit kavak (SG ≈ 0,34)	Eğilme ve kayma (PRG 320)	Dayanım E3 sınıfını karşılar; MOE ölçütünü karşılamaz	Kramer, Barbosa & Sinha, 2014: 1
P. tomentosa lamel	Yuvarlanma kayma (EN 408)	G_R = 177 MPa; $f_{R,k}$ = 2,24 MPa; öz etkisi anlamlı	Z. Wang & ark., 2018: 227
P. alba CLT	Eğilme ve kayma	Ana eksende yuvarlanma kayma ve delaminasyon kırılması	Hematabadi & ark., 2020: 1
Kavak / *F. orientalis* hibrit	Eğilme ve kayma	Tüm açıklık oranlarında saf kavak CLT'den üstün	Hematabadi & ark., 2021: 1
Kayın–kavak–kayın	Eğilme	MOE 15.700 MPa; MOR 108,73 MPa	Altaher Omer Ahmed & ark., 2023: 1
Kavak / akçaağaç–kavak	Yuvarlanma kayma, eğilme	Kavak CLT 2,12 N/mm²; akçaağaç dış katman ile f_m +%37, f_r +%48	Das & ark., 2025: 1
Kavak–akçaağaç karma	Blok kayma	10,7–10,9 N/mm² (tek tür: 4,8–5,4 N/mm²)	Das & ark., 2023: 1
E. urophylla × *E. grandis*	Eğilme, yapışma	Ticari iğne yapraklı CLT ile eşdeğer eğilme performansı	Liao & ark., 2017: 508

Tür / katman düzeni	İncelenen özellik	Temel bulgu	Kaynak
E. nitens	Yuvarlanma kayma (düzlemsel)	2,8–3,4 MPa	Ettelaei, Taoum & Nolan, 2022: 1
E. nitens / radiata / ladin	Yuvarlanma kayma (paralel yük)	4,1 / 2,7 / 1,7 MPa	Nero, Christopher & Ngo, 2022: 1
Radiata çamı	Yuvarlanma kayma	$f_{R,k}$ = 2,0 MPa; G_R = 65,5 MPa	X. Li & ark., 2021: 423
Sitka ladini (C16)	Eğilme, yuvarlanma kayma	1,0–2,0 N/mm²; kalınlık arttıkça azalır	Sikora, McPolin & Harte, 2016: 141
Japon sediri (sugi)	Yuvarlanma kayma	1,54 MPa (62 mm genişlik)	Ukyo, Shindo & Miyatake, 2019: 1
Hinoki / sugi hibrit	Düzlem dışı kayma	Enine katman 1,48 MPa; $G_R \approx 81,3$ MPa	Ukyo & ark., 2021: 1
A. mangium	Yapışma, eğilme	PRF > PUR; ≈1,5 N/mm² presleme basıncı	Mohd Yusof & ark., 2019: 1
Laran / Batai	Eğilme, basınç	CL24 rijitlik hedefinin altında	Mohamad Bhkari & ark., 2022: 2851
Karaçam / Uludağ göknarı (PVAc)	Üç noktalı eğilme	MOR 64,6 / 38,4 N/mm²	Uysal & ark., 2022: 313

Kaynak: Tabloda belirtilen çalışmalardan derlenmiştir.

Yoğunluk, hızlı büyüyen türlerin CLT performansını belirleyen en temel değişken olarak öne çıkmaktadır. Altaher Omer Ahmed & ark., (2023: 1), hibrit paneller dâhil olmak üzere ortalama panel yoğunluğunun eğilme performansının en iyi tek tahmin edicisi olduğunu göstermiştir. Kavak (yaklaşık 400–500 kg/m³), sengon ve paulownia gibi düşük yoğunluklu türlerde eğilme dayanımı çoğu zaman yeterli düzeydedir. Buna karşın elastikiyet modülü sınırda veya yetersiz kalmaktadır (Kramer, Barbosa & Sinha, 2014: 1; Mohamad Bhkari & ark., 2022: 2851). Bu nedenle bu türlerden

üretilen CLT elemanlarda tasarım çoğunlukla taşıma gücü sınır durumu yerine sehim ve titreşim gibi kullanılabilirlik sınır durumları tarafından yönetilmektedir.

Yuvarlanma kayma bakımından tablo, hızlı büyüyen türler lehine belirgin bir eğilim ortaya koymaktadır. Kavak, okaliptüs ve huş gibi yapraklıların yuvarlanma kayma dayanımı, CLT tasarımında iğne yapraklılar için kabul edilen değerlerin genellikle iki ile dört katı arasındadır (Ehrhart & Brandner, 2018: 554; Nero, Christopher & Ngo, 2022: 1; Z. Wang & ark., 2018: 227). Bu avantaj, söz konusu türlerin özellikle enine katman malzemesi olarak değerlendirilmesi için güçlü bir gerekçe oluşturmaktadır. Yuvarlanma kayma özelliklerini etkileyen başlıca parametreler; yıllık halka yönelimi, lamelin öze uzaklığı, lamel genişlik/kalınlık oranı ve kenar yapıştırmasının varlığıdır (Ettelaei, Taoum & Nolan, 2022: 1; Ukyo, Shindo & Miyatake, 2019: 1).

Yapışma ve delaminasyon performansı türün yoğunluğu ve kimyasal bileşimiyle yakından ilişkilidir. Kavak, sengon ve Sitka ladini gibi düşük yoğunluklu türler PUR yapıştırıcılarla kolaylıkla yapıştırılabilmektedir (Das & ark., 2023: 1; Sikora, McPolin & Harte, 2016: 141; Trisatya & ark., 2023: 81). Akasya ve okaliptüs gibi yoğun ve yüksek ekstraktif içerikli türlerde ise daha yüksek presleme basıncı, PRF veya MUF gibi yapıştırıcılar ve gerektiğinde astar uygulaması gerekmektedir (Dugmore & ark., 2019: 217; Liao & ark., 2017: 508; Mohd Yusof & ark., 2019: 1). Farklı türlerin aynı panelde birleştirildiği hibrit düzenlerde, türler arasındaki şişme ve büzülme farkları yapıştırma çizgilerinde iç gerilmelere ve delaminasyon riskine yol açabilir. Kayın–ladin hibritlerindeki beklenmedik düşük performans bu açıdan dikkat çekicidir (Altaher Omer Ahmed & ark., 2023: 1).

Yangın performansı, akustik davranış ve biyolojik dayanıklılık, hızlı büyüyen türlerle üretilen CLT için literatürde en az çalışılmış konulardır. Biyolojik dayanıklılık konusunda

Türkiye'den yakın zamanda yayımlanan açık arazi toprak teması çalışmaları, emprenyeli CLT'de koruyucu maddenin biyolojik direnci artırdığını, ancak retensiyon miktarı arttıkça mekanik özelliklerin azaldığını göstermiştir (Demir & ark., 2025: 814; Öztürk & ark., 2025: 800). Yangın tasarımında Eurocode 5'in ilgili bölümünde ahşabın yoğunluğuna bağlı olarak tanımlanan kömürleşme hızları esas alınmaktadır (CEN, 2004b). Düşük yoğunluklu türlerde kömürleşme hızının daha yüksek olması beklenmektedir. Bu nedenle kavak ve sengon gibi türlerden üretilen CLT elemanlarda yangın dayanımı için ek kesit veya koruyucu kaplama gerekebilir. Yapıştırma çizgisinin yüksek sıcaklıktaki davranışı da önemlidir; *A. mangium* CLT'de PRF yapıştırma çizgilerinin PUR'a kıyasla daha yüksek ısıl kararlılık gösterdiği belirlenmiştir (Mohd Yusof & ark., 2019: 1). Bağlantı elemanları açısından ise kavak CLT'de çivi ve vida çekme direncinin uygun düzeyde olduğu (Abdoli & ark., 2022: 1) ve Çin köknarı–OSB hibrit panellerde vida gömülme dayanımının karakterize edildiği görülmektedir (Yin & ark., 2024: 1).

Performans Sınırlarını Aşmaya Yönelik Çözüm Yaklaşımları

Literatürde hızlı büyüyen türlerin CLT'deki performans sınırlarını aşmaya yönelik en etkili ve en yaygın yaklaşım, hibrit tür düzenlemesidir. Bu yaklaşımda panelin eğilme rijitliğini belirleyen dış katmanlarda kayın, akçaağaç, karaçam veya okaliptüs gibi yüksek elastikiyet modüllü türler kullanılmaktadır. Kayma kuvvetlerini aktaran enine katmanlarda ise yuvarlanma kayma bakımından üstün olan kavak ve huş gibi hızlı büyüyen türler değerlendirilmektedir. Kayın–kavak (Altaher Omer Ahmed & ark., 2023: 1), akçaağaç–kavak (Das & ark., 2025: 1), kavak–Doğu kayını (Hematabadi & ark., 2021: 1) ve hinoki–sugi (Ukyo & ark., 2021: 1) kombinasyonları bu yaklaşımın başarılı örnekleridir.

İkinci yaklaşım, mühendislik ahşap ürünleriyle oluşturulan hibrit panellerdir. Z. Wang, Gong & Chui, (2015: 622), çekirdek katmanda lamine şerit kereste (LSL) kullanılan hibrit CLT'de MOE'nin %13, MOR'un ise %24 arttığını göstermiştir. PRG 320 standardının LVL ve OSL'yi lamel malzemesi olarak kabul etmesi, bu yaklaşımın standart uyumu açısından da avantajlı olduğunu göstermektedir (ANSI/APA, 2019). Çin köknarı–OSB hibrit panelleri (Yin & ark., 2024: 1) ve bambu-ahşap hibrit panelleri (J. Li & Zhao, 2025: 1; Wen & Xiao, 2023: 1) de aynı mantıkla geliştirilmiş çözümlerdir.

Üçüncü yaklaşım, lamel geometrisinin ve katman kalınlıklarının optimize edilmesidir. Boyuna katmanların kalınlığının enine katmanlara göre artırılması eğilme rijitliğini yükseltirken, enine katmanlarda genişlik/kalınlık oranının artırılması yuvarlanma kayma dayanımını iyileştirmektedir (M. Li, 2017: 331; Sikora, McPolin & Harte, 2016: 141; X. Wang & ark., 2018: 7002). Katman açılarının değiştirilmesi de kırılma modunu ve rijitliği etkileyen bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır (Rostampour Haftkhani & Hematabadi, 2022: 1).

Dördüncü yaklaşım, mukavemet sınıflandırmasının iyileştirilmesi ve sınıflandırılmış lamellerin panel içinde stratejik olarak yerleştirilmesidir. Hızlı büyüyen türlerde mekanik özelliklerin değişkenliği yüksek olduğundan, görsel sınıflandırma yerine akustik veya titreşim tabanlı makine sınıflandırması daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Yüksek sınıflı lamellerin dış katmanlara, düşük sınıflı lamellerin enine katmanlara yerleştirilmesi hem performansı hem de hammadde değerlendirme oranını artırmaktadır (Bayramoğlu & ark., 2025: 3519; Ettelaei, Taoum & Nolan, 2022: 1; Pangh & ark., 2019: 535). Kısa rotasyonlu plantasyon odununda öz içeren lamellerin ayıklanması da bu kapsamda önemli bir kalite kontrol adımı olarak değerlendirilmelidir (Z. Wang & ark., 2018: 227).

Beşinci yaklaşım, yapıştırıcı sisteminin türe göre seçilmesi ve takviye uygulamalarıdır. Düşük yoğunluklu türler için 1C-PUR, yoğun ve ekstraktif içerikli türler için PRF veya MUF yapıştırıcılar uygun görünmektedir (Das & ark., 2023: 1; Mohd Yusof & ark., 2019: 1). Tanen bazlı yapıştırıcılar ise çevresel performansı yüksek bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Trisatya & ark., 2023: 81). Yapıştırıcı kullanılmayan dübelli CLT sistemleri de hızlı büyüyen türler için araştırılmaktadır (Zhang & ark., 2025: 1). Bunlara ek olarak, hızlı büyüyen kavaktan üretilen üç katmanlı CLT panellerin alüminyum ve cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) levhalarla dıştan güçlendirilmesi de incelenmiştir. Alüminyum takviye eğilme dayanımını boyuna doğrultuda %53,9, enine doğrultuda %208; elastikiyet modülünü ise sırasıyla %56,9 ve %617 artırmış, en etkili sonuç üç katmanlı takviyeyle elde edilmiştir (Rostampour-Haftkhani & ark., 2025: 213).

Ekonomik, Çevresel ve Kurumsal Boyutlar

Hızlı büyüyen türlerin CLT'de kullanımının ekonomik gerekçesi, düşük maliyetli ve yerel olarak erişilebilir hammaddenin değerlendirilmesine dayanmaktadır. Ancak bu avantajın gerçekleşebilmesi için düşük sınıflı ve küçük boyutlu kerestenin yüksek oranda değerlendirilebilmesi gerekmektedir. Bayramoğlu & ark., (2025: 3519), karma kalite sınıflı lamel düzenlerinin CLT ürün maliyetini düşürdüğünü göstermiştir. Kuzey Amerika'da yapraklı türlerin CLT'de değerlendirilmesi, hem düşük değerli yapraklı odun için yeni bir pazar hem de CLT endüstrisi için hammadde güvencesi olarak görülmektedir (Espinoza & Buehlmann, 2018: 1).

Çevresel açıdan CLT'nin yaşam döngüsü değerlendirmeleri, beton ve çelik yapı sistemlerine kıyasla belirgin karbon avantajları ortaya koymaktadır (Duan, Huang & Zhang, 2022: 1; Younis & Dodoo, 2022: 1). Hızlı büyüyen türlerin kısa rotasyonla yetiştirilmesi, birim alan ve zaman başına karbon tutma kapasitesini

artırma potansiyeli taşımaktadır. Buna karşın ince lamel kullanımına bağlı olarak artan yapıştırma çizgisi sayısı ve yapıştırıcı tüketimi ile kurutma enerjisi, bu avantajı kısmen dengeleyebilir. Hızlı büyüyen türlerden üretilen CLT'ye özgü karşılaştırmalı yaşam döngüsü analizleri henüz oldukça sınırlıdır. Bu konu, gelecek araştırmalar için öncelikli bir alan olarak öne çıkmaktadır.

Kurumsal açıdan en önemli engel standartlardır. PRG 320'nin yapraklı türleri kapsamaması ve EN 16351'in büyük ölçüde iğne yapraklılara göre kurgulanmış olması, hızlı büyüyen yapraklı türlerden üretilen CLT'nin pazara girişini zorlaştırmaktadır (ANSI/APA, 2019; CEN, 2021). Bu türlerin yapısal kullanımı için mukavemet sınıfı atamalarının, sınıflandırma kurallarının ve yapıştırma gerekliliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Türkiye özelinde de yerli türlerin Eurocode 5 ve EN 338 kapsamındaki mukavemet sınıflarına atanması öncelikli bir ihtiyaç olarak vurgulanmaktadır (Uysal & ark., 2022: 313).

Türkiye İçin Potansiyel ve Araştırma Gündemi

Türkiye, kavak yetiştiriciliğinde köklü bir geleneğe ve geniş plantasyon alanlarına sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Kavak odunu ülkede ağırlıklı olarak kontrplak, levha ve ambalaj sanayisinde değerlendirilmektedir. Bu bölümde derlenen uluslararası bulgular, kavağın özellikle enine katman malzemesi olarak CLT'de yüksek katma değerle değerlendirilebileceğini göstermektedir (Das & ark., 2025: 1; Kramer, Barbosa & Sinha, 2014: 1; Z. Wang & ark., 2018: 227). Ayrıca Türkiye, kavakla başarılı hibritler oluşturduğu kanıtlanmış olan Doğu kayınının ana yayılış alanları arasında yer almaktadır (Hematabadi & ark., 2021: 1). Sarıçam ve karaçam gibi yerli iğne yapraklı türlerin CLT performansı da Türk araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur (Bayramoğlu & ark., 2025: 3519; Uysal & ark., 2022: 313).

Bu çerçevede Türkiye için önerilen araştırma gündemi şu öncelikleri içermektedir. İlk olarak, yerli kavak klonlarının enine katmanda, sarıçam veya karaçamın ise boyuna katmanlarda kullanıldığı hibrit CLT panellerin EN 16351'e göre yuvarlanma kayma, eğilme, blok kayma ve delaminasyon testleriyle kapsamlı biçimde karakterize edilmesi gerekmektedir. İkinci olarak, Doğu kayını–kavak hibrit CLT'nin yerli hammaddelerle üretilip test edilmesi önerilmektedir. Üçüncü olarak, kızılçam (*Pinus brutia*) ve kızılağaç (*Alnus glutinosa*) gibi geniş kaynaklara sahip ancak CLT açısından yeterince incelenmemiş türlerin lamel düzeyinde elastikiyet modülü dağılımı, öz etkisi ve yapışma özellikleri belirlenmelidir. Dördüncü olarak, Akdeniz ve Ege bölgelerindeki okaliptüs plantasyonlarının CLT için ön fizibilitesi yapılmalıdır.

Bu temel karakterizasyon çalışmalarının yanı sıra, hızlı büyüyen yerli türlerden üretilen CLT'nin yangın performansı (kömürleşme hızı), uzun süreli sünme davranışı ve hibrit panellerde boyutsal kararlılığı üzerine çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu panellerin beşikten kapıya yaşam döngüsü analizleri de gereklidir. Politika düzeyinde ise yerli türler için mukavemet sınıfı atamalarının yapılması ve kavak plantasyonlarının budama ve idare süresi gibi uygulamalarla yapısal kalitede kereste üretimini hedefleyecek biçimde yönetilmesi önerilmektedir. Bu adımlar, Türkiye'nin yerli ve yenilenebilir hammaddeye dayalı bir CLT endüstrisi kurabilmesi için gerekli bilimsel ve kurumsal altyapıyı oluşturacaktır.

Sonuç

Bu bölümde hızlı büyüyen ağaç türlerinin CLT üretiminde kullanımına ilişkin uluslararası literatür derlenmiştir. İncelenen çalışmalar, kavak, okaliptüs, radiata çamı, Sitka ladini, Japon sediri, Çin köknarı ve tropikal plantasyon türlerinin teknik olarak CLT üretiminde kullanılabildiğini göstermektedir. Literatürün ortak sonucu, bu türlerde dayanımın çoğu zaman yeterli, rijitliğin ise

sınırda veya yetersiz olduğudur. Buna karşın hızlı büyüyen yapraklı türler ve yüksek yoğunluklu okaliptüs, CLT tasarımında kritik bir özellik olan yuvarlanma kayma dayanımı bakımından standart iğne yapraklı türlere belirgin bir üstünlük sağlamaktadır.

Bu bulgular, hızlı büyüyen türlerin CLT'de tek türlü paneller yerine, her türün mekanik avantajını değerlendiren hibrit katman düzenlerinde kullanılmasının en etkili strateji olduğunu ortaya koymaktadır. Makine sınıflandırması, lamel geometrisinin optimizasyonu, türe uygun yapıştırıcı seçimi ve mühendislik ahşap ürünleriyle hibritleştirme bu stratejiyi tamamlayan çözümlerdir. Öte yandan yangın, akustik, biyolojik dayanıklılık, uzun süreli davranış ve yaşam döngüsü performansına ilişkin veriler hâlâ sınırlıdır. Bunun yanı sıra mevcut standartların yapraklı türleri yeterince kapsamaması, bu türlerin pazara girişinin önündeki en önemli kurumsal engeldir.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, kavak plantasyonları ve kayın kaynakları ile yerli iğne yapraklı türlerin birlikte kullanıldığı hibrit CLT, hem hammadde güvenliği hem de katma değer yaratma açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Ancak bu potansiyelin değerlendirilebilmesi için yerli hızlı büyüyen türlerle EN 16351 uyumlu sistematik araştırmalar yapılmalıdır. Yerli türlerin mukavemet sınıflarının tanımlanması ve araştırma kurumları ile sanayi arasında güçlü bir işbirliğinin kurulması da gereklidir.

Kaynakça

Abdoli, F., Rashidi, M., Rostampour-Haftkhani, A., Layeghi, M., & Ebrahimi, G. (2022). Withdrawal performance of nails and screws in cross-laminated timber (CLT) made of poplar (Populus alba) and fir (Abies alba). *Polymers*, *14*(15), 3129. Doi: 10.3390/polym14153129

Altaher Omer Ahmed, A., Garab, J., Horváth-Szováti, E., Kozelka, J., & Bejó, L. (2023). The bending properties of hybrid cross-laminated timber (CLT) using various species combinations. *Materials*, *16*(22), 7153. Doi: 10.3390/ma16227153

ANSI/APA. (2019). *ANSI/APA PRG 320-2019: Standard for performance-rated cross-laminated timber*. APA – The Engineered Wood Association.

Barbu, M. C., Buresova, K., Tudor, E. M., & Petutschnigg, A. (2022). Physical and mechanical properties of Paulownia tomentosa x elongata sawn wood from Spanish, Bulgarian and Serbian plantations. *Forests*, *13*(10), 1543. Doi: 10.3390/f13101543

Bayramoğlu, M. M., Demir, A., Birinci, A. U., Öztürk, H., İlhan, O., Candan, Z., & Demirkır, C. (2025). Effect of lumber quality grade on the mechanical properties and product costs of cross-laminated timber panels. *BioResources*, *20*(2), 3519–3533. Doi: 10.15376/biores.20.2.3519-3533

Birinci, A. U., Öztürk, H., Demirkır, C., & Çolakoğlu, G. (2020). Structural performance analysis of cross laminated timber (CLT) produced from pine and spruce grown in Turkey. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, *5*(5), 819–824. Doi: 10.35229/jaes.834313

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): Overview and

development. *European Journal of Wood and Wood Products*, *74*(3), 331–351. Doi: 10.1007/s00107-015-0999-5

Bülbül, R., Keskin, H., Kaya, M., Mercimek, Ö., Türer, A., Kocaman, İ., Alaşalvar, M. A. K., & Kopraman, Y. (2025). Experimental and numerical investigations of glued cross-laminated timber beams produced with different wood species and glues. *BioResources*, *20*(2), 4720–4745. Doi: 10.15376/biores.20.2.4720-4745

CEN. (2004a). *EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization.

CEN. (2004b). *EN 1995-1-2: Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design*. European Committee for Standardization.

CEN. (2012). *EN 408:2010+A1:2012 Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties*. European Committee for Standardization.

CEN. (2013). *EN 14080:2013 Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements*. European Committee for Standardization.

CEN. (2016). *EN 338:2016 Structural timber – Strength classes*. European Committee for Standardization.

CEN. (2021). *EN 16351:2021 Timber structures – Cross laminated timber – Requirements*. European Committee for Standardization.

Corpataux, L., Okuda, S., & Kua, H. W. (2020). Panel and plate properties of cross-laminated timber (CLT) with tropical fast-growing timber species in compliance with Eurocode 5.

Construction and Building Materials, *261*, 119672. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119672

da Rosa Azambuja, R., DeVallance, D. B., & McNeel, J. (2022). Evaluation of low-grade yellow-poplar (Liriodendron tulipifera) as raw material for cross-laminated timber panel production. *Forest Products Journal*, *72*(1), 1–10. Doi: 10.13073/FPJ-D-21-00050

Das, S., Gašparík, M., Sethy, A. K., Kytka, T., Kamboj, G., & Rezaei, F. (2023). Bonding performance of mixed species cross laminated timber from poplar (Populus nigra L.) and maple (Acer platanoides L.) glued with melamine and PUR adhesive. *Journal of Building Engineering*, *68*, 106159. Doi: 10.1016/j.jobe.2023.106159

Das, S., Gašparík, M., Sethy, A. K., Niemz, P., Mahapatra, M., Lagaňa, R., Langová, N., & Kytka, T. (2025). Comparative analysis of bending and rolling shear performance of poplar and hybrid maple–poplar cross-laminated timber (CLT). *Journal of Composites Science*, *9*(3), 134. Doi: 10.3390/jcs9030134

Demir, A., Öztürk, H., İlhan, O., Birinci, A. U., Demirkir, C., & Gezer, E. D. (2025). Enhancing the durability of cross-laminated timber (CLT) with boron treatment in ground-contact conditions. *Wood Material Science & Engineering*, *20*(4), 814–827. Doi: 10.1080/17480272.2025.2493710

Duan, Z., Huang, Q., & Zhang, Q. (2022). Life cycle assessment of mass timber construction: A review. *Building and Environment*, *221*, 109320. Doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109320

Dugmore, M., Nocetti, M., Brunetti, M., Naghizadeh, Z., & Wessels, C. B. (2019). Bonding quality of cross-laminated timber: Evaluation of test methods on Eucalyptus grandis panels. *Construction and Building Materials*, *211*, 217-227. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.240

Ehrhart, T., & Brandner, R. (2018). Rolling shear: Test configurations and properties of some European soft- and hardwood species. *Engineering Structures*, *172*, 554–572. Doi: 10.1016/j.engstruct.2018.05.118

Espinoza, O., & Buehlmann, U. (2018). Cross-laminated timber in the USA: Opportunity for hardwoods? *Current Forestry Reports*, *4*(1), 1–12. Doi: 10.1007/s40725-018-0071-z

Ettelaei, A., Taoum, A., & Nolan, G. (2022). Rolling shear properties of cross-laminated timber made from Australian plantation Eucalyptus nitens under planar shear test. *Forests*, *13*(1), 84. Doi: 10.3390/f13010084

FPInnovations. (2013). *CLT handbook: Cross-laminated timber* (US ed.; E. Karacabeyli & B. Douglas, Eds.). FPInnovations.

Gagnon, S., & Pirvu, C. (Eds.). (2011). *CLT handbook: Cross-laminated timber* (Canadian ed.). FPInnovations.

Harris, R. (2015). Cross laminated timber. In M. P. Ansell (Ed.), *Wood composites* (pp. 141–167). Woodhead Publishing. Doi: 10.1016/B978-1-78242-454-3.00008-1

HASSLACHER Group. (t.y.). *Cross laminated timber birch* [Ürün broşürü]. 20 Ekim 2026 tarihinde https://www.hasslacher.com/data/_dateimanager/broschuere/HNT_News_Birke_BSP_EN_Web.pdf adresinden erişildi

Hematabadi, H., Madhoushi, M., Khazaeyan, A., Ebrahimi, G., Hindman, D., & Loferski, J. (2020). Bending and shear properties of cross-laminated timber panels made of poplar (Populus alba). *Construction and Building Materials*, *265*, 120326. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120326

Hematabadi, H., Madhoushi, M., Khazaeian, A., & Ebrahimi, G. (2021). Structural performance of hybrid Poplar-Beech cross-

laminated-timber (CLT). *Journal of Building Engineering*, *44*, 102959. Doi: 10.1016/j.jobe.2021.102959

Hendrik, J., Hadi, Y. S., Massijaya, M. Y., & Santoso, A. (2016). Properties of laminated composite panels made from fast-growing species glued with mangium tannin adhesive. *BioResources*, *11*(3), 5949–5960. Doi: 10.15376/biores.11.3.5949-5960

Hindman, D. P., & Bouldin, J. C. (2015). Mechanical properties of southern pine cross-laminated timber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *27*(9), 04014251. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001203

Hlásny, T., Zimová, S., Merganičová, K., Štěpánek, P., Modlinger, R., & Turčáni, M. (2021). Devastating outbreak of bark beetles in the Czech Republic: Drivers, impacts, and management implications. *Forest Ecology and Management*, *490*, 119075. Doi: 10.1016/j.foreco.2021.119075

ISO. (2019). *ISO 16696-1:2019 Timber structures – Cross laminated timber – Part 1: Component performance, production requirements and certification scheme*. International Organization for Standardization.

Kramer, A., Barbosa, A. R., & Sinha, A. (2014). Viability of hybrid poplar in ANSI approved cross-laminated timber applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *26*(7), 06014009. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000936

Li, J., & Zhao, K. (2025). Sustainable development advantages of cross-laminated timber (CLT) and cross-laminated bamboo and timber (CLBT). *Materials*, *18*, 4913. Doi: 10.3390/ma18214913

Li, M. (2017). Evaluating rolling shear strength properties of cross-laminated timber by short-span bending tests and modified

planar shear tests. *Journal of Wood Science*, *63*(4), 331–337. Doi: 10.1007/s10086-017-1631-6

Li, X., Ashraf, M., Subhani, M., Kremer, P., Li, H., & Anwar-Us-Saadat, M. (2021). Rolling shear properties of cross-laminated timber (CLT) made from Australian Radiata Pine – An experimental study. *Structures*, *33*, 423–432. Doi: 10.1016/j.istruc.2021.04.067

Liang, Y., Taoum, A., Kotlarewski, N., & Chan, A. (2024). Bending performance of cross-laminated timber constructed from fibre-managed Eucalyptus nitens under short-term and long-term serviceability loads. *European Journal of Wood and Wood Products*, *82*(5), 1637–1650. Doi: 10.1007/s00107-024-02111-0

Liang, Y., Taoum, A., Kotlarewski, N., & Chan, A. (2025). Long-term creep behaviour of cross-laminated timber made from fibre-managed Eucalyptus nitens under uncontrolled environmental conditions. *Construction and Building Materials*, *459*, 139802. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139802

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. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.027

Markó, G., Bejó, L., & Takáts, P. (2016). Cross-laminated timber made of Hungarian raw materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *123*, 012057. DOI 10.1088/1757-899X/123/1/012059

Mohamad Bhkari, N., Wei Chen, L., Azmi, A., Shaiful Nordin, M., Wong Shew Yam, N., Ahmad, Z., & Seng Hua, L. (2022). Bending, compression and bonding performance of cross-laminated timber (CLT) made from Malaysian fast-growing timbers.

Journal of Renewable Materials, *10*(11), 2851–2869. Doi: 10.32604/jrm.2022.022326

Mohamadzadeh, M., & Hindman, D. (2015). *Mechanical performance of yellow-poplar cross laminated timber* (Report No. CE/VPI-ST-15-13). Virginia Polytechnic Institute and State University.

Mohd Yusof, N., Md Tahir, P., Lee, S. H., Khan, M. A., & Mohammad Suffian James, R. (2019). Mechanical and physical properties of cross-laminated timber made from Acacia mangium wood as function of adhesive types. *Journal of Wood Science*, *65*, 20. Doi: 10.1186/s10086-019-1799-z

Mohd Yusof, N., Md Tahir, P., Lee, S. H., Sabaruddin, F. A., Mohammad Suffian James, R., Asim Khan, M., Lee, C. H., & Roseley, A. S. M. (2021). Thermal properties of Acacia mangium cross laminated timber and its gluelines bonded with two structural adhesives. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, *23*, 1–10. Doi: 10.4067/S0718-221X2021000100402

Navaratnam, S., Christopher, P. B., Ngo, T., & Le, T. V. (2020). Bending and shear performance of Australian Radiata pine cross-laminated timber. *Construction and Building Materials*, *232*, 117215. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117215

Nero, R., Christopher, P., & Ngo, T. (2022). Investigation of rolling shear properties of cross-laminated timber (CLT) and comparison of experimental approaches. *Construction and Building Materials*, *316*, 125897. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125897

Netherer, S., Panassiti, B., Pennerstorfer, J., & Matthews, B. (2019). Acute drought is an important driver of bark beetle infestation in Austrian Norway spruce stands. *Frontiers in Forests and Global Change*, *2*, 39. Doi: 10.3389/ffgc.2019.00039

Ogunruku, M., França, T. S. F. A., França, F. J. N., Seale, R. D., Arango, R. A., & Quesada, H. J. (2024). Mechanical properties of underutilized hardwood species and potential for use in fabrication of cross-laminated timber industrial mats. *Forest Products Journal*, *74*(3), 233–241. Doi: 10.13073/FPJ-D-24-00013

Öncel, M. (2022). *Isıl işlem uygulanmış odunlardan üretilen çapraz laminasyonlu panellerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri* (Tez No. 774967) [Doktora tezi, Kastamonu Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Öztürk, H., Demir, A., Birinci, A. U., İlhan, O., Demirkir, C., & Gezer, E. D. (2025). Durability and mechanical performance of copper azole-treated cross-laminated timber (CLT) in-ground-contact exposure for 6 months. *Wood Material Science & Engineering*, *20*(4), 800–813. Doi: 10.1080/17480272.2025.2506728

Pangh, H., Hosseinabadi, H. Z., Kotlarewski, N., Moradpour, P., Lee, M., & Nolan, G. (2019). Flexural performance of cross-laminated timber constructed from fibre-managed plantation eucalyptus. *Construction and Building Materials*, *208*, 535–542. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.010

Rostampour Haftkhani, A., & Hematabadi, H. (2022). Effect of layer arrangement on bending strength of cross-laminated timber (CLT) manufactured from poplar (Populus deltoides L.). *Buildings*, *12*(5), 608. Doi: 10.3390/buildings12050608

Rostampour-Haftkhani, A., Abdoli, F., Hajializadeh, F., Rashidi, M., & Nasir, V. (2025). Bending performance of cross-laminated timber reinforced with glass fibre-reinforced polymer and aluminium sheets. *International Wood Products Journal*, *16*(3), 213–224. Doi: 10.1177/20426445251362979

Šafařík, D., Březina, D., Michal, J., & Hlaváčková, P. (2022). State of the raw wood growing stocks and prediction of further development of cutting in the context of coniferous stands calamity in the Czech Republic. *Journal of Forest Science*, *68*(10), 423–435. Doi: 10.17221/76/2022-JFS

Shi, X., Yue, K., Jiao, X., Zhang, Z., & Li, Z. (2022). Experimental investigation into lateral performance of cross-laminated timber shear walls made from fast-growing poplar wood. *Wood Material Science & Engineering*, *18*, 1212–1227. Doi: 10.1080/17480272.2022.2121659

Sikora, K. S., McPolin, D. O., & Harte, A. M. (2016). Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear. *Construction and Building Materials*, *116*, 141–150. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145

Stadelmann, G., Bugmann, H., Meier, F., Wermelinger, B., & Bigler, C. (2013). Effects of salvage logging and sanitation felling on bark beetle (Ips typographus L.) infestations. *Forest Ecology and Management*, *305*, 273–281. Doi: 10.1016/j.foreco.2013.06.003

Trisatya, D. R., Santoso, A., Abdurrachman, A., & Prastiwi, D. A. (2023). Performance of six-layered cross laminated timber of fast-growing species glued with tannin resorcinol formaldehyde. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, *51*(2), 81–97. Doi: 10.5658/WOOD.2023.51.2.81

Ukyo, S., Miyatake, A., Shindo, K., & Hiramatsu, Y. (2021). Shear strength properties of hybrid (hinoki cypress and Japanese cedar) cross-laminated timber. *Journal of Wood Science*, *67*, 23. Doi: 10.1186/s10086-021-01954-y

Ukyo, S., Shindo, K., & Miyatake, A. (2019). Evaluation of rolling shear modulus and strength of Japanese cedar cross-

laminated timber (CLT) laminae. *Journal of Wood Science*, *65*, 31. Doi: 10.1186/s10086-019-1810-8

UNECE/FAO. (2015). *Forest products annual market review 2014–2015*. United Nations.

UNECE/FAO. (2020). *Forest products annual market review 2019–2020*. United Nations.

Uysal, M., Eren, O., Karatay, H., & Memiş, D. (2022). Uludağ göknarı ve karaçam odunlarından elde edilen çapraz lamine kerestelerinin eğilme özeliklerinin incelenmesi. *Turkish Journal of Forestry*, *23*(4), 313–319. Doi: 10.18182/tjf.1166361

Wang, X., Que, Y., Hu, Y., Jiang, G., & Que, Z. (2018). Effect of different thickness of the layers of cross-laminated timber made from Chinese fir on the mechanical performance. *BioResources*, *13*(3), 7002–7016. Doi: 10.15376/biores.13.3.7002-7016

Wang, Z., Dong, W., Wang, Z., Zhou, J., & Gong, M. (2018). Effect of macro characteristics on rolling shear properties of fast-growing poplar wood laminations. *Wood Research*, *63*(2), 227–238.

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. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.035

Wen, J., & Xiao, Y. (2023). The flexural behavior of cross laminated bamboo and timber (CLBT) and cross laminated timber (CLT) beams. *Construction and Building Materials*, *408*, 133739. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133739

Yin, T., Wang, Z., Sun, C., Zhou, W., & Reynolds, T. (2024). Embedment behaviour of hybrid cross-laminated timber (HCLT) made of fast-growing Chinese fir and OSB. *Construction and Building Materials*, *438*, 137117. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137117

Younis, A., & Dodoo, A. (2022). Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle-assessment overview. *Journal of Building Engineering*, *52*, 104482. Doi: 10.1016/j.jobe.2022.104482

Zhang, Y., Long, W., Ou, J., Chen, D., & Chen, Z. (2025). Bending performance of adhesive-free cross-laminated timber panels fabricated with fast-growing Chinese fir. *European Journal of Wood and Wood Products*, *83*. Doi: 10.1007/s00107-025-02230-2

BÖLÜM 2

AHŞAP VE AHŞAP ESASLI MALZEMELERİN CNC İŞLENMESİNDE YÜZEY KALİTESİNİN TAHMİNİ VE OPTİMİZASYONU: YAPAY ZEKÂ VE MODELLEME YAKLAŞIMLARI

HASAN ÖZTÜRK[1]
ABDULLAH UĞUR BİRİNCİ[2]
AYDIN DEMİR[3]

Giriş

Ahşap ve ahşap esaslı malzemelerin işlenmesinde Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (CNC) teknolojileri, konvansiyonel yöntemlere kıyasla üretim hızı, süreç kontrolü ve yüzey kalitesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. CNC makineleri; kesme hızı, ilerleme hızı ve takım geometrisi gibi işleme parametrelerinin sayısal olarak hassas biçimde kontrol edilebilmesine, karmaşık

[1] Doçent Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Arsin Meslek Yüksek Okulu, Ormancılık Bölümü, Ormancılık ve Orman Ürünleri Programı, Orcid: 0000-0002-5422-7556
[2] Araştırma Görevlisi Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Odun Mekaniği ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0003-3273-3615
[3] Doçent Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Odun Mekaniği ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0003-4060-2578

geometrilerin tek bağlamada işlenmesine ve üretim sürecinde tekrarlanabilirliğin artırılmasına olanak tanımaktadır (Costes & Larricq, 2002: 857; Davim, Clemente & Silva, 2009: 49). CNC makinelerinin diğer otomasyon sistemleriyle esnek biçimde bütünleştirilebilmesi sayesinde mobilya üretiminde zaman kayıplarının azaldığı ve verimliliğin yaklaşık 2,5 kat artabildiği bildirilmektedir (Demir, Çakıroğlu & Aydın, 2022a: 685; Koç & ark., 2017: 12). Bu özellikler, CNC router ve işleme merkezlerini panel mobilya, kapı-kapak üretimi, masif mobilya parçaları ve dekoratif oyma uygulamalarında standart üretim teknolojisi hâline getirmiştir (Kaba & Bal, 2024: 69; Karagöz, 2011: 18).

CNC ile işlenmiş ahşap ve ahşap esaslı malzemelerde elde edilen yüzeylerin kalitesi, nihai ürün performansını doğrudan etkileyen en kritik kalite göstergelerinden biridir. Literatürde yüzey kalitesi çoğunlukla yüzey pürüzlülüğü parametreleri (Ra, Rz, Rq vb.) üzerinden değerlendirilmiş; CNC işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri çok sayıda deneysel çalışmada ayrıntılı olarak incelenmiştir (Adamčík, Kminiak & Banski, 2024: 61; Aras & Sofuoğlu, 2021a: 114; Bal, 2018: 21; Bal & Akçakaya, 2018: 86; Çakıroğlu & ark., 2022: 2501; Sofuoğlu, 2015: 6797; 2017: 33). Bu çalışmaların önemli bir bölümü, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde baskın bir parametre olduğunu, bunu iş mili devri, kesme derinliği ve adım üzerinden geçme (step-over) gibi takım yolu ayarlarının izlediğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte masif ağaç türlerinde lif yönü, yıllık halka yapısı ve anatomik özellikler gibi malzemeye özgü etkenlerin yüzey pürüzlülüğünün değişkenliğini belirgin biçimde artırdığı rapor edilmiştir (Gurău & ark., 2022: 1; Iskra & Hernández, 2009: 28; Vievesis & ark., 2025: 191).

Ahşabın heterojen ve anizotropik yapısı dikkate alındığında, yüzey kalitesinin yalnızca geometrik pürüzlülük parametreleri ile tanımlanması çoğu durumda yetersiz kalmaktadır. Yüzey kalitesi;

yüzey topografyası, lif kopmaları, kabarık lif ve mikro hasarlar gibi fiziksel yüzey özelliklerinin yanı sıra, yüzeyin sıvılarla etkileşimini belirleyen fonksiyonel özellikleri de kapsamaktadır. Özellikle ıslanabilirlik, temas açısı ve yüzey serbest enerjisi gibi parametreler, CNC ile işlenmiş yüzeylerin kaplama, yapıştırma ve laklama gibi sonraki işlemlerdeki performansını doğrudan etkilemektedir. Ancak bu fonksiyonel yüzey özelliklerinin CNC işleme bağlamında sınırlı sayıda çalışmada ele alındığı dikkat çekmektedir.

Bu alandaki sınırlı fakat önemli çalışmalar, CNC işleme parametrelerinin yalnızca yüzey pürüzlülüğünü değil, yüzeyin ıslanabilirlik davranışını da etkilediğini ve en düzgün yüzeyi veren koşullar ile en iyi ıslanabilirliği veren koşulların birbirinden farklı olabileceğini göstermektedir (Demir & ark., 2026: 352; Demir, Birinci & Öztürk, 2021: 929). Bu bulgular, CNC ile işlenmiş ahşap yüzeylerde yüzey kalitesinin çok boyutlu olarak ele alınması gerektiğine işaret etmektedir.

CNC işleme süreçlerinde yüzey kalitesinin tahmini ve optimizasyonu, çok sayıda parametrenin birbiriyle etkileşim içinde olması nedeniyle klasik deneysel yaklaşımlarla sınırlı kalabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda yapay zekâ ve modelleme tabanlı yöntemler, yüzey kalitesinin tahmin edilmesi ve optimum işleme koşullarının belirlenmesi amacıyla giderek daha fazla kullanılmaktadır. Yapay sinir ağları (YSA), Taguchi yöntemi, yanıt yüzey yöntemi (YYY) ve makine öğrenmesi tabanlı modellerin, CNC parametreleri ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri yüksek doğrulukla tahmin edebildiği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Çakıroğlu & ark., 2022: 2501; Demir, Birinci & Öztürk, 2021: 929; Sofuoğlu, 2015: 6797; 2017: 33; Yaghoubi & Rabiei, 2023: 65; Zhu & ark., 2025: 1196). Bununla birlikte bu modelleme çalışmalarının büyük çoğunluğunun yüzey kalitesini yalnızca pürüzlülük parametreleri üzerinden ele aldığı; ıslanabilirlik ve yüzey fonksiyonelliği gibi kalite göstergelerinin

modelleme ve optimizasyon süreçlerine sınırlı ölçüde dâhil edildiği görülmektedir.

Bu kitap bölümü, ahşap ve ahşap esaslı malzemelerin CNC işlenmesinde yüzey kalitesinin tahmini ve optimizasyonunu yapay zekâ ve modelleme yaklaşımları perspektifinden bütüncül olarak ele almayı amaçlamaktadır. Bölümde yüzey kalitesini belirleyen faktörler, ölçüm yöntemleri, istatistiksel ve yapay zekâ tabanlı tahmin modelleri ile optimizasyon yaklaşımları değerlendirilmekte; literatürdeki boşluklar ve gelecek araştırma alanları ortaya konmaktadır.

CNC İşleminde Yüzey Kalitesi Üzerinde Belirleyici Parametreler

CNC ile işlenmiş ahşap ve ahşap esaslı malzemelerde yüzey kalitesi, işleme sürecine ait parametreler, kesici takım özellikleri ve malzemenin yapısal karakteristiklerinin birlikte etkisiyle oluşan çok boyutlu bir çıktıdır. Singer & Özşahin, (2022: 63), bulanık analitik hiyerarşi süreci ile CNC işlemede yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörleri dört ana ve on sekiz alt faktör altında önceliklendirmiş; ahşap özellikleri ile işleme parametrelerini en önemli ana faktörler, yoğunluğu ise en önemli alt faktör olarak belirlemiştir. Bu bulgu, yüzey kalitesinin yalnızca makine ayarlarıyla değil, işlenen malzemenin kendisiyle de güçlü biçimde ilişkili olduğunu göstermektedir.

İşleme Parametreleri ve Talaş Kalınlığı

CNC işleme parametreleri arasında iş mili devri, ilerleme hızı, kesme derinliği ve adım üzerinden geçme, yüzey kalitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Bu parametrelerin ortak fiziksel karşılığı, her bir kesici ağzın kaldırdığı talaşın kalınlığıdır. Diş başına ilerleme (f_z), ilerleme hızı (v_f), iş mili devri (n) ve kesici ağız sayısı (z) ile Eşitlik 1'deki gibi ifade edilmektedir:

$$f_z = v_f / (n \cdot z) \quad (1)$$

Diş başına ilerleme küçüldükçe her ağzın yüzeyde bıraktığı kinematik iz (bıçak izi) aralığı daralmakta ve daha düzgün bir yüzey elde edilmektedir. Adamčík, Kminiak & Banski, (2024: 61) ve Adamčík & ark., (2025: 1), kayın, meşe, ladin ve huş kontrplakta yüzey pürüzlülüğünü doğrudan diş başına ilerleme ve talaş kalınlığı ile ilişkilendirmiş; kontrplakta en yüksek belirleme katsayısını diş başına ilerleme veya talaş kalınlığı ile Rp parametresi arasında bulmuştur. Costes & Larricq, (2002: 857), kayın odununu 3–62 m/s aralığındaki kesme hızlarında sabit talaş kalınlığında frezeleyerek kesme hızının yüzey kalitesine etkisini ayrıştırmıştır. Ahşap-plastik kompozitlerde de ortalama talaş kalınlığı arttıkça kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı, aynı talaş kalınlığında ise yüksek kesme hızının daha iyi yüzey verdiği belirlenmiştir (Guo & ark., 2015: 147). Bu nedenle çalışmalar arası karşılaştırmada ham devir ve ilerleme değerleri yerine diş başına ilerleme ve kesme hızının raporlanması daha anlamlı bir yaklaşımdır.

Literatürdeki çalışmaların büyük bir bölümü, ilerleme hızının artmasının yüzey pürüzlülüğünü artırdığını, iş mili devrinin artmasının ise azalttığını göstermektedir. MDF frezelemede pürüzlülüğün ilerleme hızıyla arttığı ve iş mili devriyle azaldığı, yüksek kesme hızının avantajının malzeme kaldırma hızı arttıkça daha belirgin hâle geldiği rapor edilmiştir (Davim, Clemente & Silva, 2009: 49). Benzer eğilimler MDF'de (Bal & Dumanoğlu, 2019: 9500; De Deus, Alves & Vieira, 2015: 2899; Doichinov, 2023: 99; Dumanoğlu & Bal, 2022: 615), MDF ve yapıştırılmış masif panellerin kenar frezelemesinde (Sedlecký, Sarvašová Kvietková & Kminiak, 2018: 2005), sarıçam yapıştırılmış masif panellerde (Sofuoğlu, 2017: 33), kayında (Pinkowski & ark., 2018: 5), cevizde (Kaba & Bal, 2024: 69) ve karaçam ile doğu kayınında (İlşekerci & Sofuoğlu, 2025: 14) da gözlenmiştir. Doichinov, (2023: 99),

MDF'de en iyi yüzeyin 18.000 dev/dk, 3,5 m/dk ilerleme ve 3 mm radyal kesme derinliğinde elde edildiğini; Bal & Dumanoğlu, (2019: 9500) ise gerçek boyutlu MDF dolap kapaklarında en düzgün yüzeyin yüksek devir ve düşük ilerlemede oluştuğunu belirlemiştir.

Bununla birlikte bu genel eğilimin evrensel olmadığını gösteren önemli istisnalar bulunmaktadır. Demir, Birinci & Öztürk, (2021: 929), MDF'de yüzey pürüzlülüğünün takım çapı ve ilerleme hızı arttıkça azaldığını, iş mili devri arttıkça ise arttığını bildirmiştir. Demir, Çakıroğlu & Aydın, (2022b: 363) de kontrplak, yonga levha ve MDF'de pürüzlülüğün iş mili devri ve ilerleme hızı arttıkça azaldığını rapor etmiştir. Çakıroğlu, Demir & Aydın, (2019: 598), ladin ve kestane odununda en düşük pürüzlülüğü 10.000 dev/dk ve 5.000 mm/dk koşulunda, karaçam ve irokoda ise 18.000 dev/dk koşulunda elde etmiştir. Aras & Sofuoğlu, (2021a: 114), Anadolu kestanesinde liflere dik ölçümlerde en düşük Ra değerini 16.000 dev/dk ve 1.000 mm/dk'da, liflere paralel ölçümlerde ise 12.000 dev/dk ve 2.000 mm/dk'da bulmuştur. Aynı yazarlar doğu kayınında zemin ve yan yüzeylerin farklı kesici tipi ve işleme adımı kombinasyonlarında en düşük pürüzlülüğe ulaştığını; liflere dik ölçümlerde en düşük Ra değerinin zemin yüzeyde 5,18 µm, yan yüzeyde ise 2,84 µm olduğunu raporlamıştır (Aras & Sofuoğlu, 2021b: 449). Bu çelişkili bulgular, parametre etkilerinin takım geometrisi, ağız sayısı, malzeme türü ve ölçüm yönü ile etkileşim içinde olduğunu; dolayısıyla tek bir "optimum" reçetenin farklı koşullara doğrudan aktarılamayacağını göstermektedir.

Adım üzerinden geçme ve kesme derinliği, özellikle cep boşaltma ve yüzey frezeleme işlemlerinde yüzey topografyasını ve kesme izlerinin oluşumunu belirlemektedir. Bal, (2018: 21), MDF'de adım üzerinden geçme (%20–80) ve ilerleme hızı (1–7 m/dk) arttıkça pürüzlülüğün arttığını ve işlem süresinin azaldığını; adım üzerinden geçmenin hem pürüzlülük hem de süre üzerinde ilerleme hızından daha etkili olduğunu belirlemiştir. Bal &

Akçakaya, (2018: 86) da kesme derinliği, adım üzerinden geçme ve ilerleme hızı arttıkça MDF yüzey pürüzlülüğünün arttığını göstermiştir. Yaghoubi, Rabiei & Seidi, (2024: 896), Box-Behnken tasarımıyla yaptıkları deneylerde yüzey kalitesi üzerinde en büyük etkinin yaklaşık %45 ile kesme derinliğine ait olduğunu; Zhang & ark., (2025: 1) ise ahşap-plastik kompozitte frezeleme derinliğinin %34,66 katkıyla en etkili faktör olduğunu raporlamıştır. Buna karşılık Iskra & Hernández, (2009: 28), kâğıt huşunda kesme derinliğinin yüzey kalitesini etkilemediğini bulmuştur. Angelescu, Gurau & Ispas, (2025: 1), akçaağaç ve meşede kesme derinliğinin artmasının çekirdek pürüzlülüğünü ve kabarık lif oluşumunu genel olarak artırdığını ve bu eğilimin adım üzerinden geçme değeri arttıkça güçlendiğini göstermiştir. Bal & Gündeş, (2020: 1) ise MDF'de en düşük pürüzlülüğü %6 nem, 758 kg/m^3 yoğunluk ve 1 mm kesme derinliği koşulunda elde etmiştir.

Rölyef ve üç boyutlu yüzey işlemede CAM yazılımındaki çözünürlük ve tolerans değerleri de etkilidir. Bostan & Bal, (2023: 129), çözünürlük arttıkça Ra değerinin genel olarak azaldığını; tolerans arttıkça ise pürüzlülüğün arttığını, buna karşılık enerji tüketimi ve işlem süresinin azaldığını belirlemiştir.

Kesici Takım Özellikleri ve İşleme Stratejisi

Takım geometrisi, ağız sayısı, takım çapı ve takım aşınması, kesme sırasında liflerin kesilme veya kopma biçimini doğrudan etkilemekte ve yüzey morfolojisinin oluşumunda belirleyici rol oynamaktadır. Kminiak & ark., (2020: 746), gerçek üretim koşullarında MDF frezelemede çift ağızlı frezenin tüm koşullarda tek ağızlı frezeden daha kaliteli yüzey verdiğini; yanlış frezeleme yönünün etkisinin ise yalnızca tek ağızlı frezede ortaya çıktığını göstermiştir. Sofuoğlu, (2017: 33), sarıçam yapıştırılmış masif panellerde ANOVA sonuçlarına göre kesici tipinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde en baskın faktör olduğunu belirlemiştir.

Yaghoubi & Rabiei, (2023: 65), kayında iki spiral ağızlı kesicilerin düz ağızlı ve tek spiral ağızlı kesicilere göre daha iyi yüzey verdiğini, düz ağızlı kesicilerin kayın için uygun olmadığını raporlamıştır. Buna karşılık Angelescu, Gurau & Ispas, (2025: 1), akçaağaçta helisel parmak frezenin belirgin lif yırtılmasına yol açtığını ve en iyi pürüzlülüğün düz ağızlı takımla elde edildiğini bulmuştur. Bu karşıt sonuçlar, takım geometrisi seçiminin ağaç türüne göre özelleştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Takım aşınması ve kesici ağız körelmesi, lif kopmaları, kabarık lif ve düzensiz kesme izleri gibi yüzey kusurlarını artıran temel etkenlerdendir. Keturakis & Juodeikienė, (2007: 47), huş odununda kesici ağız körelme yarıçapının (10–40 μm) ve diş başına ilerlemenin azalmasının yüzey pürüzlülüğünü azalttığını; Wilkowski & ark., (2013: 321) ise Taguchi analizinde obeche ve ladinde yüzey kalitesini anlamlı olarak etkileyen tek faktörün takım aşınma derecesi olduğunu belirlemiştir. Heisel & Ivanova, (2012: 134), masif ahşabın kritik kesme yönlerinde de iyi yüzey üretebilecek alın frezesi geometrisinin optimizasyonuna yönelik tasarım önerileri geliştirmiştir. Supadarattanawong & Rodkwan, (2006: 311) ise kauçuk ağacında yüzey kalitesi için optimum koşullar ile en az takım aşınması için optimum koşulların farklı olduğunu göstermiştir. Takım aşınmasının yüzey kalitesi modellerine girdi olarak eklendiği çalışma sayısı ise oldukça sınırlıdır.

Kesme stratejisi ve takım yolu, ahşapta metallere kıyasla daha az incelenmiş olmakla birlikte yüzey kalitesini belirgin biçimde etkilemektedir. Yang & ark., (2020: 313), aynı yön (down) frezelemenin genel olarak zıt yön (up) frezelemeye göre daha iyi yüzey verdiğini ve spiral eğrisel ağızlı kesicinin en düşük titreşimi oluşturduğunu bildirmiştir. Yaghoubi & Rabiei, (2025: 1854), raster stratejisinin kuvvet ve titreşimi belirgin biçimde azaltması nedeniyle geleneksel ve aynı yön ofset stratejilerine göre daha iyi yüzey kalitesi sağladığını; Sofuoğlu, (2017: 33) da raster stratejisinin ofset

stratejisinden daha düzgün yüzey verdiğini bulmuştur. Buna karşın Zdravković, Palija & Karadolamović, (2020: 231), ısıl işlem görmüş ve görmemiş dişbudakta ofset stratejisinin raster stratejisinden daha iyi sonuç verdiğini rapor etmiştir. Demir & ark., (2026: 352) ise MDF'de spiral kesici için ofset, düz kesici için raster stratejisinin en düzgün yüzeyi verdiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, işleme stratejisinin tek başına değil, takım tipi ve malzemeyle etkileşimi içinde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Malzeme Kaynaklı Faktörler

Malzeme kaynaklı faktörler, özellikle masif ahşaplarda yüzey kalitesinin değişkenliğini artıran önemli unsurlardır. Lif yönü ve kesme açısı bu faktörlerin başında gelmektedir. Iskra & Hernández, (2009: 28), kâğıt huşunda pürüzlülüğün ilerleme hızıyla doğrusal olarak arttığını ve en pürüzlü yüzeylerin liflere karşı 120–135° lif açısında oluştuğunu göstermiştir. Iskra & Tanaka, (2005: 167) da Japon kayınında en yüksek ses şiddetinin 135° lif açısında oluştuğunu belirlemiştir. Gurău, Coşereanu & Paiu, (2021: 1) ve Gurău & ark., (2022: 1), karaçam ve akçaağaçta CNC kesme açısının ilerleme hızından daha önemli bir faktör olduğunu; akçaağaçta 15° açıda kabarık lifin, 30–60° açılarda ise lif koparmanın baskın olduğunu göstermiştir. Lungu, Gurău & Coşereanu, (2023: 5334), meşede kesme açısının 0°'den 60°'ye çıkmasıyla çekirdek pürüzlülüğünün (Rk) yaklaşık 11–13 µm'den 28–30 µm'ye yükseldiğini ve enine kesitte dalgalılığın (Wa) belirgin biçimde arttığını raporlamıştır. Vievesis & ark., (2025: 191) ise dişbudak, meşe ve cevizde eğrisel şekillerin frezelenmesinde yıllık halka kesitinin ürün kalitesini etkileyen en önemli faktör olduğunu çok değişkenli varyans analiziyle ortaya koymuştur.

Ağaç türü, yoğunluk, nem ve sıcaklık da yüzey kalitesini anlamlı biçimde etkilemektedir. Ibrisevic & ark., (2023a: 270; 2023b: 129), aynı işleme parametrelerinde en düşük pürüzlülüğün

meşede elde edildiğini göstermiştir. Ancak bu çalışmalardan birinde ANOVA ile anlamlı fark bulunamamış ve örnek sayısının artırılması gerektiği vurgulanmıştır. Adamčík, Kminiak & Banski, (2024: 61), kayında diri odun, olgun odun ve yalancı öz odun bölgelerini ayrı ayrı değerlendirerek tür içi değişkenliğin de dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Çakmak, Malkoçoğlu & Özşahin, (2023: 1728), dört ağaç türünü %8, %12 ve %15 nem içeriklerinde ve iki lif yönünde işleyerek optimum parametrelerin her nem düzeyi için ayrı belirlenmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Korkmaz, Budakçı & Kılınç, (2024: 9343), sarıçam, kayın ve kavakta malzeme sıcaklığının −20 °C'den 50 °C'ye çıkmasıyla pürüzlülüğün %25,9 arttığını bulmuştur. İlşekerci & Sofuoğlu, (2025: 14) ise ağacın yetiştiği bakının (kuzey ve güney) bile CNC ile işlenmiş yüzeyin pürüzlülüğünü etkilediğini göstermiştir. Sütçü, (2013: 795), yapıştırılmış masif panellerde incelenen beş işleme parametresinin pürüzlülükteki değişimin yalnızca yaklaşık %27–49'unu açıklayabildiğini bildirmiştir. Bu bulgu, açıklanamayan varyansın önemli bir kısmının malzeme kaynaklı olduğunu ve tahmin modellerine malzeme değişkenlerinin eklenmesinin önemini göstermektedir.

MDF ve benzeri ahşap esaslı levhalarda lif yönünün bulunmaması ve görece homojen yapı, yüzey kalitesinin CNC parametrelerine verdiği tepkileri daha öngörülebilir kılmaktadır (Bal & Gündeş, 2020: 1; Bal & ark., 2022: 264). Bununla birlikte MDF'de pürüzlülük yoğunluk azaldıkça, nem içeriği ve kesme derinliği arttıkça artmaktadır (Bal & Gündeş, 2020: 1). Demir, Çakıroğlu & Aydın, (2022b: 363), kontrplak, yonga levha ve MDF arasında en düşük ortalama pürüzlülüğün kontrplakta elde edildiğini göstermiştir. Kontrplakta ise alternatif lif yönlü kaplama katmanları nedeniyle kaplama ayrılması (delaminasyon), lif koparma ve kabarık yüzey gibi kusurlar oluşabilmekte; huş kontrplakta en düşük pürüzlülük 20.000 dev/dk ve 10 m/dk'da elde edilirken, 12.000

dev/dk ve 18 m/dk koşulunda kinematik izler ve ayrılmış kaplamalar içeren çok pürüzlü yüzeyler oluşmaktadır (Adamčík & ark., 2025: 1; Šugárová, Adamčík & Kminiak, 2025: 35). MDFlam delmede delik çıkışındaki delaminasyon da kesici tipi, devir ve ilerleme ile değişen bir kalite ölçütüdür (Aktaş & Sofuoğlu, 2022: 29).

Modifiye ahşap ve kompozitler, yüzey kalitesi literatüründe giderek daha fazla yer almaktadır. Pelit, Korkmaz & Budakçı, (2021: 5133), 170–210 °C'de ısıl işlem görmüş çam ve kayında pürüzlülüğün genellikle azaldığını, iş mili devri arttıkça tüm örneklerde daha düzgün yüzey elde edildiğini göstermiştir. Zdravković, Palija & Karadolamović, (2020: 231), 160 °C'de ısıl işlem görmüş dişbudakta işlenmemiş odundan farklı bir parametre tepkisi gözlemiştir. Yoğunlaştırılmış kara kavakta sıkıştırma oranı, pürüzlülük üzerinde ilerleme hızıyla birlikte en etkili parametreler arasındadır (Tosun & Sofuoğlu, 2023: 55; Tosun, Sofuoğlu & Keser, 2029: 1). Ahşap-plastik kompozitlerde ise iş mili devrinin artması pürüzlülüğü azaltırken (Homkhiew & ark., 2025: 161; Zhang & ark., 2025: 1), zıt yön frezeleme çapak oluşumunu artırmaktadır (Phetsuwan & Thongkaew, 2024: 1). Farklı frezeleme yöntemlerinin kesme kuvveti, sıcaklık ve pürüzlülük üzerindeki etkileri temel bileşenler analiziyle birlikte değerlendirilmiştir (Zhu & ark., 2024: 1).

Genel olarak değerlendirildiğinde, CNC işleminde yüzey kalitesinin tek bir parametreyle açıklanamayacağı; işleme koşulları, takım özellikleri ve malzeme yapısının karşılıklı etkileşimiyle şekillendiği görülmektedir. Tablo 1'de işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki genel eğilimleri ve literatürdeki istisnalar özetlenmiştir. Bu tablo, yüzey kalitesinin yalnızca ölçülmesini değil, aynı zamanda CNC işleme parametrelerine bağlı olarak önceden tahmin edilmesini ve optimize edilmesini gerekli kılan karmaşık yapıyı açıkça göstermektedir.

Tablo 1. İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki genel eğilimleri

Parametre	Literatürdeki genel eğilim	İstisnalar ve notlar
İlerleme hızı	Arttıkça pürüzlülük artar; çoğu çalışmada en baskın faktördür (Davim, Clemente & Silva, 2009: 49; Sofuoğlu, 2017: 33)	MDF ve panellerde ters eğilim raporlanmıştır (Demir, Birinci & Öztürk, 2021: 929; Demir, Çakıroğlu & Aydın, 2022b: 363); ölçüm yönüne göre optimum değişebilir (Aras & Sofuoğlu, 2021a: 114)
İş mili devri	Arttıkça pürüzlülük azalır (Bal & Dumanoğlu, 2019: 9500; Pelit, Korkmaz & Budakçı, 2021: 5133)	Bazı türlerde en iyi yüzey düşük devirde elde edilmiştir (Çakıroğlu, Demir & Aydın, 2019: 598); devir artışı enerji tüketimini artırır (Bal & ark., 2022: 264)
Diş başına ilerleme / talaş kalınlığı	Azaldıkça pürüzlülük azalır (Adamčík & ark., 2025: 1; Guo & ark., 2015: 147)	Çalışmalar arası karşılaştırma için en uygun bağımsız değişkendir
Kesme derinliği	Arttıkça pürüzlülük artar (Bal & Gündeş, 2020: 1; Yaghoubi, Rabiei & Seidi, 2024: 896)	Kâğıt huşunda etkisiz bulunmuştur (Iskra & Hernández, 2009: 28)
Adım üzerinden geçme	Arttıkça pürüzlülük artar, işlem süresi azalır (Bal, 2018: 21; Yaghoubi & Rabiei, 2023: 65)	Kesme derinliğiyle etkileşim içindedir (Angelescu, Gurau & Ispas, 2025: 1)
Takım tipi ve ağız sayısı	Çok ağızlı kesiciler genellikle daha iyi yüzey verir (Kminiak & ark., 2020: 746)	Helisel/düz ağız üstünlüğü türe göre değişir (Angelescu, Gurau & Ispas, 2025: 1; Yaghoubi & Rabiei, 2023: 65)
İşleme stratejisi	Raster stratejisi kuvvet ve titreşimi azaltabilir (Yaghoubi & Rabiei, 2025: 1854)	Dışbudakta ofset daha iyidir (Zdravković, Palija & Karadolamović, 2020: 231); takım tipine bağlıdır (Demir & ark., 2026: 352)
Lif yönü / kesme açısı	Liflere karşı ve ara açılarda pürüzlülük artar (Gurău & ark., 2022: 1; Iskra & Hernández, 2009: 28)	Kesme açısı ilerleme hızından daha etkili olabilir (Gurău, Coşereanu & Paiu, 2021: 1)

Parametre	Literatürdeki genel eğilim	İstisnalar ve notlar
Yoğunluk, nem, sıcaklık	Yoğunluk azaldıkça, nem ve sıcaklık arttıkça pürüzlülük artar (Bal & Gündeş, 2020: 1; Korkmaz, Budakçı & Kılınç, 2024: 9343)	Yoğunluk en önemli alt faktör olarak önceliklendirilmiştir (Singer & Özşahin, 2022: 63)

Kaynak: Yazar tarafından ilgili literatürden derlenmiştir.

Yüzey Kalitesinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi

Yüzey kalitesinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan geometrik göstergeler arasında aritmetik ortalama sapma (Ra), ortalama maksimum profil yüksekliği (Rz), karesel ortalama sapma (Rq), en yüksek tepe (Rp) ve en derin vadi (Rv) parametreleri ile çekirdek pürüzlülüğü (Rk) ve dalgalılık (Wa) parametreleri yer almaktadır. Bu parametreler, CNC ile işlenmiş yüzeylerin nicel olarak karşılaştırılmasına olanak tanımakta ve işleme parametrelerinin etkilerinin değerlendirilmesinde temel bir referans oluşturmaktadır (Bal, 2018: 21; Sofuoğlu, 2015: 6797). İncelenen çalışmalarda ölçümler DIN 4768, TS 971, ISO 4287 ve ISO 4288 gibi farklı standartlara göre yapılmıştır (Aras & Sofuoğlu, 2021a: 114; Bal, 2018: 21; Demir, Çakıroğlu & Aydın, 2022a: 685). Güncel çalışmalarda ise ISO 4287 ve ISO 4288'in yerini alan ISO 21920-2 standardı kullanılmaya başlanmıştır (Aras & Sofuoğlu, 2024: 42). Parametre tanımlarının, değerlendirme uzunluklarının ve filtreleme koşullarının standartlar arasında farklılık göstermesi, çalışmalar arası sayısal karşılaştırmayı zorlaştırmaktadır.

Ahşap yüzeyinde ölçülen profil, işleme kaynaklı pürüzlülük ile anatomik boşlukların (traheler, lümenler, erken ve geç odun farkı) bileşkesidir. Gurau, Mansfield-Williams & Irle, (2005: 43), işleme pürüzlülüğünün anatomik düzensizliklerden ayrılması gerektiğini göstermiş; standart Gauss filtresinin derin gözenekler nedeniyle profilde bozulma oluşturduğunu tespit etmiştir. Gurau & Irle, (2017: 119), ahşap ürünlerde yüzey pürüzlülüğü değerlendirme yöntemlerine ilişkin derlemelerinde iğneli (stylus) ölçüm cihazı,

yeterli değerlendirme uzunluğu ve robust Gauss regresyon filtresi kullanımını içeren bir ölçüm yaklaşımı önermiştir. Kabarık lif, lif koparma ve kaplama ayrılması gibi kusurlar Ra değerine tam olarak yansımayabilmektedir. Bu nedenle pürüzlülük ölçümlerinin dalgalılık analizi ve mikroskobik inceleme ile desteklenmesi önerilmektedir (Angelescu, Gurau & Ispas, 2025: 1; Gurău & ark., 2022: 1; Lungu, Gurău & Coşereanu, 2023: 5334).

Ölçüm yöntemi açısından iğneli profilometreler ahşap çalışmalarının büyük çoğunluğunda kullanılmaktadır; ancak uç yarıçapı nedeniyle derin gözenekler tam olarak izlenemez. Sedlecký, Sarvašová Kvietková & Kminiak, (2018: 2005), temassız ölçümün daha doğru, ancak daha pahalı ve zaman alıcı olduğunu belirlemiştir. Koç & ark., (2017: 12) iğneli cihaz ile lazer tabanlı robotik ölçüm sistemini karşılaştırmış; Adamčík, Kminiak & Banski, (2024: 61) ve Adamčík & ark., (2025: 1) dijital mikroskopla pürüzlülük ölçümünü kusur analiziyle bütünleştirmiş; Keturakis & Juodeikienė, (2007: 47) ise optik mikrografilerden yüzey düzensizliklerini hesaplamıştır. İki yöntem grubunun sonuçları birebir eşdeğer olmadığından, tahmin modellerinde kullanılan ölçüm yöntemi açıkça raporlanmalıdır.

Yüzey kalitesinin fonksiyonel boyutu, CNC ile işlenmiş yüzeylerin kaplama, yapıştırma ve laklama gibi sonraki işlemlerdeki performansını belirleyen kritik bir unsurdur. Islanabilirlik, temas açısı ve yüzey serbest enerjisi gibi parametreler, yüzeyin sıvılarla etkileşimini tanımlamakta ve yüzey kalitesinin yalnızca geometrik değil, aynı zamanda fiziksel ve kimyasal yönlerini de ortaya koymaktadır. Zhong, (2021: 1), derlemesinde daha pürüzlü ahşap yüzeylerin daha yüksek yapışma direnci verebildiğine dikkat çekmektedir. Bu durum, “daha düşük pürüzlülük her zaman daha iyi yüzey” varsayımının fonksiyonel açıdan sorgulanması gerektiğini göstermektedir. Literatürde fonksiyonel parametrelerin CNC işleme bağlamında sınırlı sayıda çalışmada ele alındığı görülmektedir (Çakıroğlu & ark., 2022: 2501; Demir & ark., 2026: 352; Demir,

Birinci & Öztürk, 2021: 929; Zdravković, Palija & Karadolamović, 2020: 231).

Deneysel Tasarım ve İstatistiksel Modelleme Yaklaşımları

CNC işleme parametrelerinin etkilerinin belirlenmesinde en yaygın yaklaşım, tam faktöriyel deney tasarımı ve çok yönlü varyans analizidir (ANOVA). Türkiye'deki çalışmaların büyük bölümü üç ya da dört faktörlü tam faktöriyel tasarımlarla faktörlerin ana ve etkileşim etkilerini sınamaktadır (Bal & Gündeş, 2020: 1; Koç & ark., 2017: 12; Korkmaz, Budakçı & Kılınç, 2024: 9343). Bu tasarımlar, daha sonra yapay sinir ağlarının eğitimi için de veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Hazır, Erdinler & Koç, (2018: 1423), Nordmann göknarında beş faktörlü iki seviyeli (2^5) faktöriyel tasarım ve istenilirlik fonksiyonu ile minimum pürüzlülüğü teğet ve radyal kesme yönleri için sırasıyla 3,58 ve 3,21 µm olarak belirlemiştir. Vievesis & ark., (2025: 191) çok değişkenli varyans analizini (MANOVA), Zhu & ark., (2024: 1) ise temel bileşenler analizini kullanarak birden fazla kalite çıktısını birlikte değerlendirmiştir.

Taguchi yöntemi, ortogonal diziler ve sinyal/gürültü (S/N) oranı ile az sayıda deneyle optimum parametre seviyelerinin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Gaitonde, Karnik & Davim, (2008: 209), MDF frezelemede Taguchi ortogonal dizisi ile minimum pürüzlülüğün yüksek kesme hızı ve düşük ilerlemede elde edildiğini göstermiştir. Sofuoğlu, (2017: 33), sarıçam yapıştırılmış masif panellerde Taguchi yöntemiyle belirlenen optimum koşullarda doğrulama deneylerinde Ra değerinin 2,8 kat, Rz değerinin 2,0 kat azaldığını bildirmiştir. Sütçü, (2013: 795) yapıştırılmış masif panellerde, Wilkowski & ark., (2013: 321) obeche ve ladinde, Aktaş & Sofuoğlu, (2022: 29) ise MDFlam delmede Taguchi tasarımını kullanmıştır. Taguchi yaklaşımı deney maliyetini önemli ölçüde azaltmakla birlikte, faktörler arası etkileşimleri sınırlı ölçüde

yakalamakta ve tek bir yanıta odaklanmaktadır. Bu nedenle çok yanıtlı problemlerde başka optimizasyon yöntemleriyle birleştirilmektedir.

Yanıt yüzey yöntemi, Box-Behnken ve merkezi kompozit tasarımlar aracılığıyla ikinci ya da daha yüksek dereceden polinom modellerle parametre etkileşimlerini haritalamaktadır. Hazır & Özcan, (2019: 2795), kayında iş mili devri, ilerleme hızı, takım yarıçapı ve kesme derinliği için ikinci dereceden bir model kurmuş; modeli önce istenilirlik fonksiyonuyla, ardından genetik algoritmayla optimize etmiştir. Hazır & Koç, (2019: 493), Lübnan sedirinde Taguchi L27 dizisine dayalı YYY modellerini istenilirlik fonksiyonu ve benzetimli tavlama algoritmasıyla optimize etmiş; Ra ve Rz modelleri için sırasıyla %95,91 ve %96,12 belirleme katsayısı elde etmiştir. Yaghoubi, Rabiei & Seidi, (2024: 896), Box-Behnken tasarımına dayalı 27 deneyle optimum durumda 3,38 µm pürüzlülük hesaplamış ve bu değerin en iyi ve en kötü deneylere göre sırasıyla %14 ve %58 iyileşme sağladığını göstermiştir. Box-Behnken tasarımı ısıl işlem görmüş dişbudakta (Zdravković, Palija & Karadolamović, 2020: 231) ve ahşap-plastik kompozitlerde (Homkhiew & ark., 2025: 161) de başarıyla uygulanmıştır.

İstatistiksel modellerin tahmin başarısı, karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkilerde sınırlı kalabilmektedir. Yang & ark., (2023: 1), çam odununun yüksek hızlı frezelenmesinde merkezi kompozit tasarım modelinin ortalama tahmin hatasını %12,2, aynı veri için kurulan YSA modelinin hatasını ise %7,8 olarak bulmuştur. Iskra & Hernández, (2009: 28) da istatistiksel regresyon ve YSA modellerini bağımsız doğrulama verisiyle karşılaştırmış ve YSA'nın daha düşük hata verdiğini göstermiştir. Zhu & ark., (2022: 1), kayında YYY ile uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemini (ANFIS) karşılaştırmış ve optimum koşulları 15° talaş açısı, 3.357 dev/dk ve 0,62 mm kesme derinliği olarak belirlemiştir. Bununla birlikte istatistiksel modeller, parametre etkilerinin yorumlanabilirliği ve

deney tasarımı ile doğrudan bağlantısı nedeniyle yapay zekâ modellerinin tamamlayıcısı olarak önemini korumaktadır.

Yapay Sinir Ağları ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Tahmin Modelleri

Yapay sinir ağları, CNC ile işlenmiş ahşap yüzeylerinde yüzey kalitesi tahmininde en yaygın kullanılan yapay zekâ yöntemidir. Bu alanda Türk araştırmacılar öncü bir rol üstlenmiştir. Sofuoğlu, (2015: 6797), sarıçam yapıştırılmış masif panellerde kesici tipi, takım yolu stratejisi, iş mili devri, ilerleme hızı ve kesme derinliğini girdi alan tek gizli katmanlı YSA modellerinde Ra ve Rz için ortalama mutlak yüzde hatasını (MAPE) sırasıyla %20,18 ve %15,14 olarak hesaplamıştır. Gürgen & ark., (2022: 1) ise sarıçamda MAPE değeri %4'ün altında olan bir YSA modeli geliştirmiştir. Bu karşılaştırma, aynı tür üzerinde bile model başarısının girdi seçimine, veri miktarına ve ağ mimarisine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir.

Karadeniz Teknik Üniversitesi kökenli çalışmalar, YSA'yı yalnızca tahmin için değil, deneyde kullanılmayan ara parametre değerleri için kalite haritaları üretmek amacıyla da kullanmıştır. Demir, Çakıroğlu & Aydın, (2022a: 685), ladin için optimum takım çapı, iş mili devri ve ilerleme hızını sırasıyla 2 mm, 10.000 dev/dk ve 5 m/dk; kayın için ise 4 mm, 12.500 dev/dk ve 5 m/dk olarak belirlemiştir. Çakıroğlu & ark., (2022: 2501), ceviz ve dişbudakta yüzey pürüzlülüğü, ıslanabilirlik, enerji tüketimi ve işlem süresini YSA ile birlikte modellemiştir. Çakmak, Malkoçoğlu & Özşahin, (2023: 1728), dört ağaç türü, üç nem düzeyi ve iki lif yönü için pürüzlülük ve kesme gücünü yüzlerce aday arasından seçilen 16 YSA modeliyle tahmin etmiştir. Bu çalışmada iş mili devri, ilerleme hızı ve ağız sayısı, bıçak izi uzunluğuna dayalı olarak belirlenmiştir. Yang & ark., (2023: 1) ise talaş boyutunu girdi olarak kullanan bir YSA ile 0,95 belirleme katsayısı elde etmiş ve süreçten elde edilen

ölçülebilir büyüklüklerin model girdisi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Yoğunlaştırılmış ahşapta Tosun & Sofuoğlu, (2023: 55), Ra tahmini için tek gizli katmanlı bir YSA ile %6,61 MAPE elde etmiştir. Ancak bu çalışmada korelasyon katsayısı eğitim aşamasında 0,971 iken doğrulamada 0,854'e ve testte 0,767'ye düşmüştür. Bu durum, küçük veri setlerinde aşırı öğrenme riskinin somut bir örneğidir. Tosun, Sofuoğlu & Keser, (2026: 1) aynı malzemede Rz değerini sınıflandırma problemi olarak ele almış ve çok katmanlı algılayıcı ile %97, öğrenen vektör nicemleme (LVQ) ile %100 sınıflandırma başarısı bildirmiştir. Rabiei & Yaghoubi, (2023: 1), tam faktöriyel 81 deneyden elde edilen verilerle veri işlemenin grup yöntemi (GMDH) tabanlı bir sinir ağı eğitmiş ve arı algoritmasıyla optimizasyon sonucunda pürüzlülüğü 4,36 µm'ye, işlem süresini 93 s'ye indirmiştir.

Bulanık mantık tabanlı ve hibrit yaklaşımlar da giderek yaygınlaşmaktadır. Szwajka, Zielińska-Szwajka & Trzepieciński, (2023: 1), MDF frezelemede iş parçasına bağlı ivmeölçerden elde edilen titreşim sinyallerini kinematik parametrelerle birleştirerek alansal pürüzlülüğü (Sq) tahmin etmiştir. Bu çalışmada radyal tabanlı fonksiyon sinir ağı ile 0,379 µm, Takagi-Sugeno-Kang bulanık modeli ile 0,198 µm kök ortalama kare hatası (RMSE) elde edilmiştir. Ahşap-plastik kompozitlerde geri yayılımlı (BP) sinir ağları (Zhang & ark., 2025: 1) ve genetik algoritma ile optimize edilmiş BP ağları (Zhu & ark., 2025: 1196) yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetinin tahmininde kullanılmıştır. Zhang & ark., (2025: 1), modelin en yüksek tahmin hatasını %4,89 olarak bildirmekle birlikte, optimum koşullarda yapılan doğrulama deneylerinde en yüksek hatanın %16,87'ye çıktığını göstermiştir. Bu fark, eğitim verisindeki başarının yeni koşullara doğrudan aktarılamayabileceğini ortaya koymaktadır.

Son dönemde ahşap literatürü, metal işleme literatürünü izleyerek klasik çok katmanlı algılayıcıların ötesine geçmektedir. Huang & ark., (2025a: 1), ısıl işlem görmüş ahşabın frezelenmesinde modifikasyon sıcaklığı, kesme derinliği, ilerleme hızı ve iş mili devrini girdi alarak kesme kuvveti ve pürüzlülük için rastgele orman, destek vektör makinesi, Gauss süreç regresyonu ve çok katmanlı algılayıcı modellerini karşılaştırmış; en iyi doğruluğu Gauss süreç regresyonu ile elde etmiştir. Huang & ark., (2025b: 744) ise SHAP ve LIME yöntemleriyle açıklanabilirlik analizi yapmış, XGBoost modelini rastgele ormandan daha doğru bulmuş ve öznitelik önem sıralamasını kesme derinliği, ilerleme hızı, modifikasyon sıcaklığı ve iş mili devri olarak belirlemiştir. Açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları, "kara kutu" olarak eleştirilen modellerin sonuçlarının malzeme bilimi açısından yorumlanabilmesine olanak tanıması bakımından önemlidir. Seçilmiş modelleme çalışmalarının karşılaştırması Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. CNC işlemede yüzey kalitesinin tahmini ve optimizasyonuna yönelik seçilmiş modelleme çalışmaları

Çalışma	Malzeme	Yöntem	Temel bulgu / performans
Iskra & Hernández, (2009: 28)	Kâğıt huşu	Regresyon, YSA	YSA, doğrulama verisinde regresyondan daha düşük hata vermiştir
Sofuoğlu, (2015: 6797)	Sarıçam yapıştırılmış panel	YSA (Ra, Rz)	RMSE: 1,05 ve 3,70; MAPE: %20,18 ve %15,14
Hazır & Koç, (2019: 493)	Lübnan sediri	Taguchi L27, YYY, benzetimli tavlama	R^2: %95,91 (Ra) ve %96,12 (Rz)
Demir, Birinci & Öztürk, (2021: 929)	MDF	YSA	Pürüzlülük ve yüzey serbest enerjisi için farklı optimumlar
Gürgen & ark., (2022: 1)	Sarıçam	YSA + GA	MAPE < %4; minimum Ra için optimum koşullar
Çakıroğlu & ark., (2022: 2501)	Ceviz, dişbudak	YSA (çok yanıtlı)	Pürüzlülük, ıslanabilirlik, enerji ve süre birlikte modellenmiştir

Çalışma	Malzeme	Yöntem	Temel bulgu / performans
Zhu & ark., (2022: 1)	Kayın	YYY, ANFIS	Optimum: 15° talaş açısı, 3.357 dev/dk, 0,62 mm
Çakmak, Malkoçoğlu & Özşahin, (2023: 1728)	Dört ağaç türü	16 YSA modeli	Nem düzeyine özgü optimum parametreler
Rabiei & Yaghoubi, (2023: 1)	Ahşap	GMDH + arı algoritması	Bileşik amaçta %23 iyileşme; 4,36 µm ve 93 s
Szwajka, Zielińska-Szwajka & Trzepieciński, (2023: 1)	MDF	RBF-YSA, TSK bulanık model	RMSE (Sq): 0,379 µm ve 0,198 µm
Yang & ark., (2023: 1)	Çam	Merkezi kompozit tasarım, YSA	Ortalama hata: %12,2 ve %7,8; R^2 = 0,95
Tosun & Sofuoğlu, (2023: 55)	Yoğunlaştırılmış kavak	YSA (Ra)	MAPE %6,61; test R = 0,767
Yaghoubi, Rabiei & Seidi, (2024: 896)	Ahşap	Box-Behnken, YYY	Optimum Ra 3,38 µm; kesme derinliği etkisi ≈ %45
Huang & ark., (2025a: 1)	Isıl işlem görmüş ahşap	RF, SVM, GPR, MLP	En iyi model: Gauss süreç regresyonu
Zhang & ark., (2025: 1)	Ahşap-plastik kompozit	BP-YSA, çok amaçlı PSO	Model hatası %4,89; doğrulama hatası %16,87

Kaynak: Yazar tarafından ilgili literatürden derlenmiştir.

Optimizasyon Yaklaşımları ve Çok Amaçlı Optimizasyon

CNC işlemede optimizasyon çalışmaları, başlangıçta tek bir kalite çıktısının (genellikle Ra) en aza indirilmesine odaklanmıştır. Bu kapsamda Taguchi S/N analizi (Sofuoğlu, 2017: 33) ve istenilirlik fonksiyonu (Hazır, Erdinler & Koç, 2018: 1423) yaygın biçimde kullanılmıştır. Daha sonra regresyon ya da YSA modellerinin amaç fonksiyonu olarak kullanıldığı metasezgisel yaklaşımlar gelişmiştir. Bu yaklaşımlar arasında genetik algoritma (Gürgen & ark., 2022: 1; Hazır & Özcan, 2019: 2795), benzetimli

tavlama (Hazır & Koç, 2019: 493) ve arı algoritması (Rabiei & Yaghoubi, 2023: 1) öne çıkmaktadır. Gürgen & ark., (2022: 1), YSA ile GA'yı birleştirerek sarıçamda minimum pürüzlülük için optimum koşulları 1874,5 rad/s iş mili hızı, 3,0 m/dk ilerleme, 9,7 mm kesme derinliği ve 12 mm eksenel kesme derinliği olarak belirlemiştir. Zhu & ark., (2025: 1196) ise GA ile optimize edilmiş BP sinir ağı kullanarak ahşap-plastik kompozitte en düşük kesme kuvveti ve pürüzlülüğü veren koşulları belirlemiştir.

Endüstriyel uygulamalarda ise yüzey kalitesi tek başına bir hedef değildir; işlem süresi, enerji tüketimi, takım ömrü, toz ve gürültü emisyonu gibi çıktılarla birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çıktılar çoğu zaman yüzey kalitesiyle çatışmaktadır. Bal & Dumanoğlu, (2019: 9500), iş mili devri arttıkça pürüzlülüğün azaldığını fakat toplam enerji tüketiminin arttığını; ilerleme hızı arttıkça ise pürüzlülüğün arttığını fakat enerji tüketiminin azaldığını göstermiştir. Bal & ark., (2022: 264), iş mili devrinin 8.000'den 16.000 dev/dk'ya çıkarılmasının enerji tüketimini %154 artırdığını; adım üzerinden geçmenin %20'den %60'a ve ilerleme hızının 3'ten 7 m/dk'ya çıkarılmasının ise enerji tüketimini sırasıyla %63 ve %60 azalttığını belirlemiştir. Bu bulgular, en iyi yüzey kalitesini sağlayan koşulların en yüksek enerji tüketimine yol açabildiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Çatışan amaçların birlikte ele alınması için farklı çok amaçlı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Loc & Hung, (2021: 72), tropik bir ağaç türünde en yüksek yüzey kalitesi, en düşük kesme gücü ve en yüksek verimlilik hedeflerini kısıtlı doğrusal olmayan optimizasyon problemleriyle çözmüştür. Rabiei & Yaghoubi, (2023: 1), pürüzlülük ve işlem süresini bileşik bir amaç fonksiyonunda birleştirerek en iyi deneye göre yaklaşık %23 iyileşme sağlamıştır. Zhang & ark., (2025: 1) ise çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu ile minimum pürüzlülük ve maksimum malzeme kaldırma hızı arasında Pareto cephesi oluşturmuş; kaba, yarı ince ve ince işleme için farklı

parametre kombinasyonları önermiştir. Pareto tabanlı bu yaklaşım, karar vericiye tek bir optimum yerine üretim önceliğine göre seçilebilecek bir çözüm kümesi sunması bakımından endüstriyel uygulamaya daha uygundur.

Sağlık ve çevre boyutu da optimizasyon problemlerine dâhil edilmeye başlanmıştır. Çakıroğlu, (2025: 1), ladin ve sarıçamın CNC ile frezelenmesinde PM2,5 ve PM10 toz emisyonlarını makine öğrenmesi algoritmalarıyla tahmin etmiş ve en iyi performansı Cubist modelinin gösterdiğini bildirmiştir. Bu çalışmada en yüksek emisyonlar sarıçamda 18.000 dev/dk ve 3 m/dk koşulunda ölçülmüştür. Söz konusu yüksek devir ve düşük ilerleme kombinasyonu, literatürde genellikle daha düzgün yüzey sağlayan koşullara karşılık gelmektedir. Bu nedenle yalnızca minimum pürüzlülüğü hedefleyen tek amaçlı optimizasyon, ince toz emisyonunu artırarak iş sağlığı açısından olumsuz sonuçlar doğurabilir. Çakıroğlu, Demirarslan & Taşdemir, (2025: 1), üç boyutlu CNC işlemede ağaç türüne göre toz emisyonunun belirgin biçimde değiştiğini; Souri & Rabiei, (2025: 1) ise CNC ile ahşap frezelemede gürültü kirliliğinin YYY tabanlı çok parametreli optimizasyonla azaltılabileceğini göstermiştir.

Fonksiyonel Yüzey Özelliklerinin Tahmin ve Optimizasyon Süreçlerine Dâhil Edilmesi

Yüzey kalitesinin fonksiyonel boyutunu tahmin ve optimizasyon süreçlerine doğrudan dâhil eden çalışmalar sınırlı sayıda olmakla birlikte, alanın gelişimi açısından en dikkat çekici sonuçları sunmaktadır. Demir, Birinci & Öztürk, (2021: 929), MDF'de üç takım çapı, dört iş mili devri ve üç ilerleme hızı ile işlenen yüzeylerde pürüzlülük ve temas açısı ölçümleri yapmış, yüzey serbest enerjisini hesaplamış ve her iki çıktıyı YSA ile modellemiştir. Çalışmada pürüzlülük için optimum koşullar 6 mm takım çapı, 20.000 dev/dk ve 2 m/dk iken, yüzey serbest enerjisi için

optimum koşullar 6 mm, 16.500 dev/dk ve 2 m/dk olarak belirlenmiştir. Demir & ark., (2026: 352), MDF'de iki kesici tipi, iki takım yolu stratejisi, üç iş mili devri ve dört kesme derinliği ile çalışmıştır. En düzgün yüzey spiral kesici ve ofset strateji için 22.500 dev/dk ve 1,6 mm, düz kesici ve raster strateji için 21.500 dev/dk ve 1,7 mm'de elde edilmiştir. En iyi lak ıslanabilirliği ise spiral kesici için 20.500 dev/dk ve 1,5 mm, düz kesici için 20.500 dev/dk ve 3,1 mm'de sağlanmıştır.

Bu sonuçlar, geometrik pürüzlülük ve fonksiyonel yüzey davranışı için optimum işleme koşullarının farklı olduğunu; dolayısıyla yalnızca pürüzlülüğe göre yapılan optimizasyonun kaplama ve yapıştırma performansı açısından en iyi sonucu garanti etmediğini göstermektedir. Çakıroğlu & ark., (2022: 2501) da ceviz ve dişbudakta ıslanabilirliği pürüzlülük, enerji ve süre ile birlikte modelleyerek bu yaklaşımın masif ahşaba genişletilebileceğini ortaya koymuştur. Isıl işlem gibi modifikasyonların yüzey hidrofobikliğini değiştirdiği dikkate alındığında (Zdravković, Palija & Karadolamović, 2020: 231), işleme parametreleri ile malzeme modifikasyonunun fonksiyonel yüzey özellikleri üzerindeki ortak etkisinin modellenmesi önemli bir araştırma alanıdır. Temas açısının zamana ve sıvı türüne bağlı olarak değişmesi ve ıslanabilirlik ile nihai kaplama performansı arasındaki ilişkinin çoğu çalışmada doğrudan ölçülmemesi ise bu alandaki başlıca yöntemsel güçlüklerdir.

Sensör Tabanlı İzleme, Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilirlik

Deney tasarımına dayalı modellerin çoğu yüzey kalitesini işleme parametrelerinden çevrim dışı olarak tahmin ederken, sensör tabanlı yaklaşımlar işlem sırasında ölçülen sinyallerden çevrimiçi kestirim yapmayı amaçlamaktadır. Iskra & Tanaka, (2005: 167), ses şiddeti ile yüzey pürüzlülüğü arasında ilerleme hızından bağımsız güçlü bir ilişki bulmuştur. Iskra & Hernández, (2012: 115) sensör

seçimi ve pürüzlülük tahmini üzerine çalışmış; Iskra & Hernández, (2010: 523) ise çevrimiçi pürüzlülük tahminine dayalı olarak ilerleme hızını ayarlayan ve pürüzlülüğü belirlenen bir eşiğin altında tutan uyarlamalı bir kontrol sistemi geliştirmiştir. Szwajka, Zielińska-Szwajka & Trzepieciński, (2023: 1) titreşim sinyallerinin kinematik parametrelere eklenmesinin tahmin doğruluğunu artırdığını göstermiş; Yang & ark., (2020: 313) kesici ağız şeklinin titreşime etkisini incelemiş; Wei & ark., (2018: 2139) ise takım aşınması ve pürüzlülüğün çevrimiçi izlenmesine yönelik sistemleri derlemiştir.

Bu yapı taşları; sensör füzyonu, uyarlamalı kontrol, malzeme özelliklerinin hat içi ölçümü ve enerji, toz ve gürültü tahmin modelleri ile birlikte CNC işleme için dijital ikiz uygulamalarının temelini oluşturabilecek niteliktedir. Korkmaz, Budakçı & Kılınç, (2024: 9343), malzeme sıcaklığının kontrolünün değişken iklim koşullarında yüzey kalitesinin tutarlılığı için kritik olabileceğini vurgulamıştır. Bununla birlikte incelenen literatürde ahşap CNC işleme için doğrulanmış bir dijital ikiz uygulamasına rastlanmamıştır. Sürdürülebilirlik açısından enerji tüketimi (Bal & ark., 2022: 264; Bostan & Bal, 2023: 129), ince toz emisyonu (Çakıroğlu, 2025: 1) ve gürültü (Souri & Rabiei, 2025: 1), yüzey kalitesiyle eşdeğer yanıt değişkenleri olarak ele alınmalıdır.

Literatürdeki Boşluklar ve Gelecek Araştırma Önerileri

İncelenen çalışmalar, CNC ile işlenmiş ahşap yüzeylerinde kalite tahmini ve optimizasyonuna ilişkin önemli bir bilgi birikimi oluştuğunu göstermekle birlikte, aşağıdaki boşlukların ve sınırlılıkların altını çizmektedir:

- Veri setlerinin büyük çoğunluğu tek laboratuvar, tek makine ve tek takımla elde edilmiş 27–108 deney noktasından oluşmaktadır. Eğitim ve test başarısı arasındaki belirgin farklar (Tosun & Sofuoğlu, 2023: 55;

Zhang & ark., 2025: 1), aşırı öğrenme ve genellenebilirlik sorununa işaret etmekte; çok makineli veri setleri ve transfer öğrenme bu sorunun çözümünde potansiyel taşımaktadır.

- Ölçüm standartları, filtreleme koşulları ve ölçüm yönü çalışmalar arasında farklılık göstermektedir. ISO 21920 serisine geçiş ve ahşaba özgü robust filtreleme önerilerinin (Gurau & Irle, 2017: 119) yaygınlaştırılması karşılaştırılabilirliği artıracaktır.
- Islanabilirlik, yüzey serbest enerjisi ve kaplama performansı gibi fonksiyonel yüzey özellikleri az sayıda çalışmada modellenmiştir (Demir & ark., 2026: 352; Demir, Birinci & Öztürk, 2021: 929). Geometrik ve fonksiyonel çıktıları birlikte tahmin eden çok çıktılı modellere ihtiyaç duyulmaktadır.
- Takım aşınması, kesme stratejisi ve titreşim modellere nadiren girdi olarak eklenmekte; yonga levha, OSB, LVL ve CLT için yapay zekâ çalışmaları sınırlı kalmakta; görüntü tabanlı derin öğrenme ve açıklanabilir yapay zekâ yöntemlerinin kullanımı ise başlangıç aşamasında bulunmaktadır (Huang & ark., 2025b: 744).
- Model performansı çalışmalar arasında R, R^2, MSE, RMSE, MAE ve MAPE gibi farklı ölçütlerle ve çoğu zaman yalnızca eğitim verisi için raporlanmaktadır. Veri bölme stratejisinin, çapraz doğrulamanın ve bağımsız test metriklerinin standart biçimde raporlanması gerekmektedir.

Sonuçlar

Bu bölümde, ahşap ve ahşap esaslı malzemelerin CNC işlenmesinde yüzey kalitesinin tahmini ve optimizasyonuna yönelik

deneysel, istatistiksel ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar değerlendirilmiştir. Literatür, daha küçük talaş kalınlığının, yani genellikle daha yüksek iş mili devri ve daha düşük ilerleme hızı, kesme derinliği ve adım üzerinden geçmenin, çoğu durumda daha düzgün yüzey sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte takım geometrisi, işleme stratejisi, lif yönü, yoğunluk, nem ve sıcaklık bu ilişkiyi belirgin biçimde değiştirmekte; raporlanan çelişkili bulgular evrensel bir optimum parametre setinin bulunmadığını ortaya koymaktadır. Taguchi, faktöriyel tasarım ve yanıt yüzey yöntemi yorumlanabilir araçlar olmaya devam ederken; yapay sinir ağları, ANFIS, GMDH, Gauss süreç regresyonu ve topluluk öğrenme yöntemleri, metasezgisel algoritmalarla birleştirildiğinde yüzey kalitesi ile enerji, süre ve verimlilik arasında denge kurulmasına olanak tanımaktadır. Ancak modellerin büyük bölümü küçük ve tek kaynaklı veri setlerine dayandığından, bildirilen yüksek doğruluk değerlerinin endüstriye aktarılmasında dikkatli olunmalıdır.

Bölümün temel vurgusu, yüzey kalitesinin yalnızca geometrik bir gösterge olarak değil, kaplama, yapıştırma ve laklama performansını belirleyen fonksiyonel bir özellik olarak ele alınması gerektiğidir. Gelecek araştırmaların; geometrik ve fonksiyonel yüzey özelliklerini enerji, toz ve gürültü gibi sürdürülebilirlik göstergeleriyle birlikte ele alan, sensör verisiyle desteklenen ve çok makineli açık veri setleriyle doğrulanan açıklanabilir yapay zekâ modellerine yönelmesi, mobilya ve ağaç işleri endüstrisinin dijital dönüşümüne önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynakça

Adamčík, L., Kminiak, R., & Banski, A. (2024). Comparison of the roughness of the CNC milled surface of selected wood species. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*, *66*(2), 61–74. Doi: 10.17423/afx.2024.66.2.06

Adamčík, L., Šugárová, V., Kminiak, R., Schmidtová, J., Banski, A., & Galajda, P. (2025). Optimization of technological parameters of CNC milling of plywood depending on surface roughness. *European Journal of Wood and Wood Products*, *83*, 118. Doi: 10.1007/s00107-025-02272-6

Aktaş, E. N., & Sofuoğlu, S. D. (2022). MDFlamın delinmesinde Taguchi yöntemi kullanılarak delaminasyon faktörünün incelenmesi. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, *5*(1), 29–39. Doi: 10.33725/mamad.1126117

Angelescu, A.-M., Gurau, L., & Ispas, M. (2025). Surface quality of CNC face-milled maple (*Acer pseudoplatanus*) and oak (*Quercus robur*) using two end-mill tool types and varying processing parameters. *Applied Sciences*, *15*(13), 6975. Doi: 10.3390/app15136975

Aras, O., & Sofuoğlu, S. D. (2021a). Anadolu kestanesi (*Castenia sativa* Mill.) ağaç türünün CNC ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün işleme parametreleri ile ilişkisi. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, *4*(2), 114–125. Doi: 10.33725/mamad.992157

Aras, O., & Sofuoğlu, S. D. (2021b). Doğu kayını ağaç türünün CNC ile işlenmesinde işleme yüzeylerinin ve parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisinin araştırılması. *Turkish Journal of Forestry*, *22*(4), 449–456. Doi: 10.18182/tjf.987276

Aras, O., & Sofuoğlu, S. D. (2024). Analyze the effects of CNC machining parameters on the surface roughness (Rz) of Anatolian chestnut. *Tree and Forest*, *5*(1), 42–50. Doi: 10.59751/agacorman.1467058

Bal, B. C. (2018). CNC makinelerinin bazı ayarlarının parça işleme süresi ve lif levhanın yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, *1*(1), 21–30. Doi: 10.33725/mamad.427588

Bal, B. C., & Akçakaya, E. (2018). The effects of step over, feed rate and finish depth on the surface roughness of fiberboard processed with CNC machine. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, *1*(2), 86–93. Doi:10.33725/mamad.481278

Bal, B. C., & Dumanoğlu, F. (2019). Surface roughness and processing time of a medium density fiberboard cabinet door processed via CNC router, and the energy consumption of the CNC router. *BioResources*, *14*(4), 9500–9508. Doi: 10.15376/biores.14.4.9500-9508

Bal, B. C., & Gündeş, Z. (2020). Surface roughness of medium-density fiberboard processed with CNC machine. *Measurement*, *153*, 107421. Doi: 10.1016/j.measurement.2019.107421

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. Doi: 10.17475/kastorman.1215347

Bostan, T., & Bal, B. C. (2023). CNC makineleri ile ahşap yüzeylerin şekillendirilmesinde çözünürlük ve tolerans değerlerinin önemi. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, *19*(2), 129–142. Doi: 10.58816/duzceod.1359993

Çakıroğlu, E. O. (2025). Prediction of dust emissions during CNC milling of spruce and pine with machine learning. *European Journal of Wood and Wood Products*, *83*, 173. Doi: 10.1007/s00107-025-02306-z

Çakıroğlu, E. O., Demir, A., & Aydın, İ. (2019). Determination of the optimum feed rate and spindle speed depending on the surface roughness of some wood species processed with CNC machine. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, *4*(4), 598–601. Doi: 10.35229/jaes.635310

Çakıroğlu, E. O., Demir, A., Aydın, İ., & Büyüksarı, Ü. (2022). Prediction of optimum CNC cutting conditions using artificial neural network models for the best wood surface quality, low energy consumption, and time savings. *BioResources*, *17*(2), 2501–2524. Doi: 10.15376/biores.17.2.2501-2524

Çakıroğlu, E. O., Demirarslan, K. O., & Taşdemir, T. (2025). Characterization of wood dust emission according to some wood species in 3D machining applied with CNC machine. *European Journal of Wood and Wood Products*, *83*, 59. Doi: 10.1007/s00107-025-02222-2

Çakmak, A., Malkoçoğlu, A., & Özşahin, Ş. (2023). Optimization of wood machining parameters using artificial neural network in CNC router. *Materials Science and Technology*, *39*(14), 1728–1744. Doi: 10.1080/02670836.2023.2180901

Costes, J.-P., & Larricq, P. (2002). Towards high cutting speed in wood milling. *Annals of Forest Science*, *59*(8), 857–865. Doi: 10.1051/forest:2002084

Davim, J. P., Clemente, V. C., & Silva, S. (2009). Surface roughness aspects in milling MDF (medium density fibreboard). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *40*(1–2), 49–55. Doi: 10.1007/s00170-007-1318-z

De Deus, P. R., Alves, M. C. S., & Vieira, F. H. A. (2015). The quality of MDF workpieces machined in CNC milling machine in cutting speeds, feedrate, and depth of cut. *Meccanica*, *50*(12), 2899–2906. Doi: 10.1007/s11012-015-0187-z

Demir, A., Birinci, A. U., İlhan, O., & Öztürk, H. (2026). Identification of optimal cutting parameters regarding lacquer wettability of CNC processed MDF panels by artificial neural network. *Wood Material Science & Engineering*, *21*(1), 352–364. Doi: 10.1080/17480272.2024.2426780

Demir, A., Birinci, A. U., & Öztürk, H. (2021). Determination of the surface characteristics of medium density fibreboard processed with CNC machine and optimisation of CNC process parameters by using artificial neural network. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *35*, 929–942. Doi: 10.1016/j.cirpj.2021.10.005

Demir, A., Çakıroğlu, E. O., & Aydın, İ. (2022a). Determination of CNC processing parameters for the best wood surface quality via artificial neural network. *Wood Material Science & Engineering*, *17*(6), 685–692. Doi: 10.1080/17480272.2021.1929466

Demir, A., Çakıroğlu, E. O., & Aydın, İ. (2022b). Effects of CNC processing parameters on surface quality of wood-based panels used in furniture industry. *Drvna Industrija*, *73*(4), 363–371. Doi: 10.5552/drvind.2022.2109

Doichinov, A. (2023). Optimization of the CNC milling process via modifying some parameters of the cutting mode when processing MDF workpieces. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*, *65*(2), 99–107. Doi: 10.17423/afx.2023.65.2.09

Dumanoğlu, F., & Bal, B. C. (2022). CNC makinesi ile işlenmiş lif levhaların yüzey pürüzlülüğü ve işlem süresi üzerine

işleme parametrelerinin etkileri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *25*(4), 615–621. Doi: 10.17780/ksujes.1144224

Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., & Davim, J. P. (2008). Prediction and optimization of surface roughness in milling of medium density fibreboard (MDF) based on Taguchi orthogonal array experiments. *Holzforschung*, *62*(2), 209–214. Doi: 10.1515/HF.2008.030

Guo, X., Li, R., Cao, P., Ekevad, M., Cristóvão, L., Marklund, B., & Grönlund, A. (2015). Effect of average chip thickness and cutting speed on cutting forces and surface roughness during peripheral up milling of wood flour/polyvinyl chloride composite. *Wood Research*, *60*(1), 147–156.

Gurău, L., Coşereanu, C., & Paiu, I. (2021). Comparative surface quality of larch (*Larix decidua* Mill.) fretwork patterns cut through by CNC routing and by laser. *Applied Sciences*, *11*(15), 6875. Doi: 10.3390/app11156875

Gurău, L., Coşereanu, C., Timar, M. C., Lungu, A., & Condoroţeanu, C. D. (2022). Comparative surface quality of maple (*Acer pseudoplatanus*) cut through by CNC routing and by CO2 laser at different angles as related to the wood grain. *Coatings*, *12*(12), 1982. Doi: 10.3390/coatings12121982

Gurau, L., & Irle, M. (2017). Surface roughness evaluation methods for wood products: A review. *Current Forestry Reports*, *3*(2), 119–131. Doi: 10.1007/s40725-017-0053-4

Gurau, L., Mansfield-Williams, H., & Irle, M. (2005). Processing roughness of sanded wood surfaces. *Holz als Roh- und Werkstoff*, *63*(1), 43–52. Doi: 10.1007/s00107-004-0524-8

Gürgen, A., Çakmak, A., Yıldız, S., & Malkoçoğlu, A. (2022). Optimization of CNC operating parameters to minimize

surface roughness of *Pinus sylvestris* using integrated artificial neural network and genetic algorithm. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, *24*, 1. Doi: 10.4067/S0718-221X2022000100401

Hazır, E., Erdinler, E. S., & Koç, K. H. (2018). Optimization of CNC cutting parameters using design of experiment (DOE) and desirability function. *Journal of Forestry Research*, *29*(5), 1423–1434. Doi: 10.1007/s11676-017-0555-8

Hazır, E., & Koç, K. H. (2019). Optimization of wood machining parameters in CNC routers: Taguchi orthogonal array based simulated angling algorithm. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, *21*(4), 493–510. Doi: 10.4067/S0718-221X2019005000406

Hazır, E., & Özcan, T. (2019). Response surface methodology integrated with desirability function and genetic algorithm approach for the optimization of CNC machining parameters. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *44*(3), 2795–2809. Doi: 10.1007/s13369-018-3559-6

Heisel, U., & Ivanova, S. (2012). Investigations into the influence of the geometry of face milling cutters on the quality formation. *Wood Material Science & Engineering*, *7*(3), 134–142. Doi: 10.1080/17480272.2012.662700

Homkhiew, C., Cheewawuttipong, W., Srivabut, C., Boonchouytan, W., & Rawangwong, S. (2025). Machinability of wood-plastic composites from the CNC milling process using the Box-Behnken design and response surface methodology for building applications. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *38*(1), 161–187. Doi: 10.1177/08927057241248036

Huang, W., Chen, H., Jin, Q., Shi, J., Guo, X., & Na, B. (2025a). Prediction of milling performance of thermally modified wood based on machine learning. *European Journal of Wood and Wood Products*, *83*(2), 63. Doi: 10.1007/s00107-025-02224-0

Huang, W., Jin, Q., Guo, X., & Na, B. (2025b). Interpretative analyses for milling surface roughness prediction in thermally modified timber: Shapley value (SHAP) and local interpretable model-agnostic explanations (LIME). *Wood Material Science & Engineering*, *20*(3), 744–752. Doi: 10.1080/17480272.2025.2466218

Ibrisevic, A., Busuladzic, I., Mihulja, G., Obucina, M., Hajdarevic, S., & Smajic, S. (2023a). Effect of CNC machining parameters on surface quality of different kind of wood. In *Current trends and challenges for forest-based sector: Carbon neutrality and bioeconomy. Proceedings of the 16th International Scientific Conference WoodEMA 2023* (pp. 270–274). WoodEMA.

Ibrisevic, A., Hajdarevic, S., Kitek Kuzman, M., Obucina, M., Mihulja, G., & Busuladzic, I. (2023b). Effects of cutting parameters and grain direction on surface quality of three wood species obtained by CNC milling. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, *16(65)*, 127–140. Doi: 10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.3.9

İlşekerci, İ., & Sofuoğlu, S. D. (2025). The effect of the aspect and machining parameters on CNC machining of solid wood material. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, *9*(1), 14–22. Doi: 10.30516/bilgesci.1641807

Iskra, P., & Hernández, R. E. (2009). The influence of cutting parameters on the surface quality of routed paper birch and surface roughness prediction modeling. *Wood and Fiber Science*, *41*(1), 28–37.

Iskra, P., & Hernández, R. E. (2010). Toward a process monitoring and control of a CNC wood router: Development of an adaptive control system for routing white birch. *Wood and Fiber Science*, *42*(4), 523–535.

Iskra, P., & Hernández, R. E. (2012). Toward a process monitoring of CNC wood router. Sensor selection and surface roughness prediction. *Wood Science and Technology*, *46*(1–3), 115–128. Doi: 10.1007/s00226-010-0378-7

Iskra, P., & Tanaka, C. (2005). The influence of wood fiber direction, feed rate, and cutting width on sound intensity during routing. *Holz als Roh- und Werkstoff*, *63*(3), 167–172. Doi: 10.1007/s00107-004-0541-7

Kaba, O., & Bal, B. C. (2024). CNC makinesi kesme parametrelerinin ceviz odununun yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *27*(1), 69–77. Doi: 10.17780/ksujes.1352802

Karagöz, Ü. (2011). CNC ile işlemede ahşap malzemenin yüzey kalitesini etkileyen faktörler. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, *11*(1), 18–26.

Keturakis, G., & Juodeikienė, I. (2007). Investigation of milled wood surface roughness. *Materials Science (Medžiagotyra)*, *13*(1), 47–51.

Kminiak, R., Siklienka, M., Igaz, R., Krišťák, Ľ., Gergeľ, T., Němec, M., Réh, R., Očkajová, A., & Kučerka, M. (2020). Effect of cutting conditions on quality of milled surface of medium-density fibreboards. *BioResources*, *15*(1), 746–766. Doi: 10.15376/biores.15.1.746-766

Koç, K. H., Erdinler, E. S., Hazır, E., & Öztürk, E. (2017). Effect of CNC application parameters on wooden surface quality. *Measurement*, *107*, 12–18. Doi: 10.1016/j.measurement.2017.05.001

Korkmaz, M., Budakçı, M., & Kılınç, İ. (2024). Assessment of surface roughness in milling of wood with different material

temperature and cutting parameters. *BioResources*, *19*(4), 9343–9357. Doi: 10.15376/biores.19.4.9343-9357

Loc, N. H., & Hung, T. Q. (2021). Optimization of cutting parameters on surface roughness and productivity when milling wood materials. *Journal of Machine Engineering*, *21*(4), 72–89. Doi: 10.36897/jme/144426

Lungu, A., Gurău, L., & Coşereanu, C. (2023). Evaluation of CNC routed surface quality of maple (*Acer pseudoplatanus*) and oak (*Quercus robur* L.) with different milling angles as function of grain orientation. *BioResources*, *18*(3), 5334–5350. Doi: 10.15376/biores.18.3.5334-5350

Pelit, H., Korkmaz, M., & Budakçı, M. (2021). Surface roughness of thermally treated wood cut with different parameters in CNC router machine. *BioResources*, *16*(3), 5133–5147. Doi: 10.15376/biores.16.3.5133-5147

Phetsuwan, W., & Thongkaew, K. (2024). A study of slot milling factors affecting the machined surface quality of wood-plastic composites. *Recent Science and Technology*, *17*(2), 262664.

Pinkowski, G., Szymański, W., Krauss, A., & Stefanowski, S. (2018). The effect of the feed speed and rotation speed of plane milling on the surface roughness of beech wood. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology*, *103*, 5–12.

Rabiei, F., & Yaghoubi, S. (2023). A comprehensive investigation on the influences of optimal CNC wood machining variables on surface quality and process time using GMDH neural network and bees optimization algorithm. *Materials Today Communications*, *36*, 106482. Doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.106482

Sedlecký, M., Sarvašová Kvietková, M., & Kminiak, R. (2018). Medium-density fiberboard (MDF) and edge-glued panels

(EGP) after edge milling – Surface roughness after machining with different parameters. *BioResources*, *13*(1), 2005–2021. Doi: 10.15376/biores.13.1.2005-2021

Singer, H., & Özşahin, Ş. (2022). Prioritization of factors affecting surface roughness of wood and wood-based materials in CNC machining: A fuzzy analytic hierarchy process model. *Wood Material Science & Engineering*, *17*(2), 63–71. Doi: 10.1080/17480272.2020.1778079

Sofuoğlu, S. D. (2015). Using artificial neural networks to model the surface roughness of massive wooden edge-glued panels made of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) in a machining process with computer numerical control. *BioResources*, *10*(4), 6797–6808. Doi: 10.15376/biores.10.4.6797-6808

Sofuoğlu, S. D. (2017). Determination of optimal machining parameters of massive wooden edge glued panels which is made of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Taguchi design method. *European Journal of Wood and Wood Products*, *75*(1), 33–42. Doi: 10.1007/s00107-016-1028-z

Souri, S., & Rabiei, F. (2025). Reduction of noise pollution in CNC wood milling through multi-parameter optimization using response surface methodology. *PLOS ONE*, *20*(12), e0332222. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12704844/

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. Doi: 10.17423/afx.2025.67.1.04

Supadarattanawong, S., & Rodkwan, S. (2006). An investigation of the optimal cutting conditions in parawood (*Hevea brasiliensis*) machining process on a CNC wood router. *Kasetsart Journal (Natural Science)*, *40*, 311–319.

Sütçü, A. (2013). Investigation of parameters affecting surface roughness in CNC routing operation on wooden EGP. *BioResources*, *8*(1), 795–805. Doi: 10.15376/biores.8.1.795-805

Szwajka, K., Zielińska-Szwajka, J., & Trzepieciński, T. (2023). The use of a radial basis function neural network and fuzzy modelling in the assessment of surface roughness in the MDF milling process. *Materials*, *16*(15), 5292. Doi: 10.3390/ma16155292

Tosun, M., & Sofuoğlu, S. D. (2023). The use of an artificial neural network for predicting the machining characterizing of wood materials densified by compressing. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, *7*(1), 55–62. Doi: 10.30516/bilgesci.1240583

Tosun, M., Sofuoğlu, S. D., & Keser, K. (2026). Prediction of surface roughness at the machining of densified wood surfaces. *Wood Material Science & Engineering*, 21(1), 82-90. Doi: 10.1080/17480272.2024.2402828

Vievesis, M., Kujalavicius, Z., Keturakis, G., Gyliene, V., & Jablonskyte, J. (2025). Impact of machining parameters on surface roughness in CNC hardwood milling: A multivariate approach. *Advances in Production Engineering & Management*, *20*(2), 191–204. Doi: 10.14743/apem2025.2.535

Wei, W., Li, Y., Xue, T., Tao, S., Mei, C., Zhou, W., Wang, J., & Wang, T. (2018). The research progress of machining mechanisms in milling wood-based materials. *BioResources*, *13*(1), 2139–2149. Doi: 10.15376/biores.13.1.Wei

Wilkowski, J., Rousek, M., Svoboda, E., Kopecký, Z., & Czarniak, P. (2013). Analysis of the influence of cutting parameters on surface roughness of milled wood based on Taguchi techniques. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology*, *84*, 321–325.

Yaghoubi, S., & Rabiei, F. (2023). Investigating the effects of CNC milling machine parameters and machining tool specifications on surface roughness of wooden products. *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, *35*(3), 65–74. Doi: 10.22067/jacsm.2023.81172.1167

Yaghoubi, S., & Rabiei, F. (2025). A profound evaluation of different strategies to improve surface roughness of manufactured part in wood-CNC machining process. *Journal of Engineering Research*, *13*, 1854–1860. Doi: 10.1016/j.jer.2024.05.033

Yaghoubi, S., Rabiei, F., & Seidi, M. (2024). A comprehensive assessment on surface quality of machined wooden products via Box-Behnken design method. *Wood Material Science & Engineering*, *19*(4), 896–905. Doi: 10.1080/17480272.2023.2290212

Yang, C., Liu, Q., Jiang, T., Song, M., Ma, Y., & Liu, J. (2020). Test analysis and verification of the influence of milling cutter blade shape on wood milling. *Wood Research*, *65*(2), 313–322. Doi: 10.37763/wr.1336-4561/65.2.313322

Yang, C., Ma, Y., Liu, T., Ding, Y., & Qu, W. (2023). Experimental study of surface roughness of pine wood by high-speed milling. *Forests*, *14*(6), 1275. Doi: 10.3390/f14061275

Zdravković, V., Palija, T., & Karadolamović, Z. (2020). Influence of thermal modification of ash wood (*Fraxinus excelsior* L.) and machining parameters in CNC face milling on surface roughness using response surface methodology (RSM). *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, *11*(2), 231–241.

Zhang, F., Buck, D., Guo, X., Zhang, T., & Qian, L. (2025). Multi-objective method integrated with back propagation neural network analysis for surface quality in wood–plastic composite

milling. *European Journal of Wood and Wood Products*, *83*, 68. Doi: 10.1007/s00107-025-02225-z

Zhong, Z.-W. (2021). Surface roughness of machined wood and advanced engineering materials and its prediction: A review. *Advances in Mechanical Engineering*, *13*(5). Doi: 10.1177/16878140211017632

Zhu, Y., Buck, D., Guan, J., Song, M., Tang, Q., Guo, X., & Zhu, Z. (2024). Effects of milling methods on cutting performance of wood–plastic composites based on principal component analysis. *Forests*, *15*(9), 1516. Doi: 10.3390/f15091516

Zhu, Z., Buck, D., Song, M., Tang, Q., Guan, J., Zhou, X., & Guo, X. (2025). Enhancing face-milling efficiency of wood–plastic composites through the application of genetic algorithm–back propagation neural network. *Wood Material Science & Engineering*, *20*(6), 1196–1203. Doi: 10.1080/17480272.2024.2388844

Zhu, Z., Jin, D., Wu, Z., Xu, W., Yu, Y., Guo, X., & Wang, X. (2022). Assessment of surface roughness in milling of beech using a response surface methodology and an adaptive network-based fuzzy inference system. *Machines*, *10*(7), 567. Doi: 10.3390/machines10070567

BÖLÜM 3

FARKLI ODUN SİRKELERİNİN BAZI FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Berkay SEVİCİ[1]

Muhammet KARAŞAHİN[2]

Giriş

Bir taraftan dünya nüfusu sürekli artarken diğer taraftan gıda üretiminin gerçekleştiği tarım arazileri; bilinçsiz sulama, gübreleme, ilaçlama, toprak işleme ve tarım alanlarını yerleşime açma gibi hatalı kullanım nedeniyle kirlenmekte, erozyonla kaybolmakta ve gün geçtikçe daralmaktadır. Ayrıca iklim değişikliği nedeniyle de bitkiler sıklıkla kuraklık, sıcaklık (aşırı sıcak ve soğuk), sel, tuzluluk, ağır metal toksisiteleri ve yetersiz oksijen gibi abiyotik stres koşullarına maruz kalmaktadırlar. Bitki büyüme ve gelişimini olumsuz yönde etkileyen, biyolojik sistemine ve fonksiyonuna zarar veren tüm olumsuz faktörler stres olarak tanımlanmaktadır. Karşılaşılan stresin şiddetine göre verim ve kalite kayıpları %50-80'lere ulaşabilmektedir (Zhang et al., 2019; Karaşahin, 2022).

[1] Selçuk Üniversitesi Çumra Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu Organik Tarım İşletmeciliği Bölümü

[2] Prof. Dr. Selçuk Üniversitesi Çumra Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu Organik Tarım İşletmeciliği Bölümü ORCID: 0000-0001-8586-0701

Bitkiler stres etkenleri ile karşılaştığında hızlı bir şekilde salisilik asit üretmekte ve salisilik asit bitkilerin savunma mekanizmalarında önemli görevler yapmaktadır. Ayrıca salisilik asidin olumsuz şartlarda bitkilerde çiçeklenmeyi uyarıcı etkilerinin olduğu da tespit edilmiştir (Li et al., 2019; Gümüş, 2021). Kuraklık gibi abiyotik streslere maruz kaldıklarında bitkiler, bitki büyüme düzenleyicileri ile morfolojik, fizyolojik, sitolojik değişiklikler, biyomoleküler, hormonal cevaplar ve genetiksel tepkiler vererek savunma mekanizmalarını geliştirmekte ve olumsuz koşullarda dayanıklılıklarını arttırabilmektedirler. Bu mekanizmalardan bazıları fotosentez, solunumu azaltarak stomaların kapanması, yeni proteinlerin sentezlenmesi ve ozmolitlerin bir araya toplanması, kinaz birikimi, reaktif oksijen türleri oluşumu, absisik asit ve jasmonik asit gibi antimitojenik hormonları birikerek çeşitli sinyal uyarımlar oluşturmaktadır (Yüksel and Aksoy, 2017; Beyoğlu, 2022).

Söğüt (*Salix*), söğütgiller (*Salicaceae*) familyasından *Salix* cinsini oluşturan ağaç türüdür. Söğüt tanen (%15) ve etkili madde olarak bir glikozit (salisin) içerir. Söğütgiller (*Salicaceae*) ailesine ait odunsu bir bitki olan kavak ağacınında benzer miktarlarda salisin içerdiği bildirilmiştir (Gümüş, 2021). Salisilik asit uygulamasının tohum çimlenmesi, vejetatif büyüme, çiçeklenme, meyve verimi, yaşlanma, stoma kapanması, termojenez, fotosentez, solunum, alternatif solunum yolundaki değişiklikler, glikoliz ve krebs döngüsü de dahil olmak üzere bitki büyümesinin ve gelişiminin birçok yönünü etkilediğine dair kanıtlar vardır (Dempsey and Klessig, 2017; Klessig et al., 2018). Borgen and Nielsen (2001), tohum çimlenmesi ve gücü üzerinde olumsuz yan etkiler olmaksızın asetik asitle tohum muamelesinin buğday ve arpada tohum kaynaklı hastalıkları kontrol altına alıp alamayacağını araştırmışlardır. Kışlık buğdayda, %5 asetik asit dozunda, 20 ml kg^{-1} kullanım ile tohum gücü üzerinde olumsuz bir etki görülmeksizin adi sürmenin sırasıyla %96 ve %92 oranında kontrol edildiği; ancak daha yüksek dozlarda

30 ml kg^{-1} ve 40 ml kg^{-1} kullanımda çimlenme gücünün, çimlenme hızı açısından önemli ölçüde azaldığı bildirilmiştir.

Yapılan araştırmalarda arpa bitkisine dışardan asetik asit uygulamasının, histon asetilasyonunu ve jasmonik asit sinyal mekanizmasını teşvik ederek kuraklık dayanıklılığını arttırdığı gösterilmiştir (Kim et al., 2017; Utsumi et al., 2019).

Çimlenme ve çıkış esnasında oluşabilecek ve verimi olumsuz etkileyebilecek çeşitli etmenleri engellemeye, tohum gücünü arttırmaya yönelik alternatif olarak ekim öncesinde tohumların sirke ile muamele edilmesi önerilmekte, sirkedeki asetik asitin etkileri araştırmalarla ortaya konulmaktadır. Asetik asit, özellikle geleneksel pestisitlerin yasak olduğu organik tarımda olası bir uygulama alanı olan ucuz ve çevre dostu bir fungisittir (Borgen and Nielsen, 2001). Sentetik pestisitlerin yoğun kullanımından dolayı ortaya çıkan problemler, alternatif yöntemlerin ve doğal pestisitlerin aranmasını zorunlu hale getirmiştir. Toprakta uzun süre kalan pestisitler, faydalı mikroorganizmaların faaliyetlerini engellemekte, kısmen veya tamamen yok olmasına sebep olmaktadır. Biyopestisitler; hayvanlar, bitkiler, bakteriler ve çeşitli mineraller gibi doğal maddelerden elde edilmektedir (Yarsan and Çevik, 2007). Doğal pestisit potansiyelindeki odun sirkesi, ısıl işlem ile elde edilen (pyrolysis liquids) bir üründür ve uzun zamandan beri doğal organik pestisit olarak kullanılmaktadır (Tiilikkala et al., 2010, Koç et al., 2017).

Pirolignöz asit olarak da tanımlanan odun sirkesi, biyokütlenin pirolizi ile ortaya çıkan bir üründür. Biyokütlenin piroliz işlemi sırasında açığa çıkan buhar, gaz ve dumanın damıtılması ile oluşan sıvının dinlendirilmesi ve bir süre bekletilmesi sonrasında oluşan üç katmanlı oluşumun orta katmanına odun sirkesi denilmektedir. Odun sirkesinin bileşimi biyokömür üretiminde kullanılan biyokütlenin çeşidi ve piroliz koşullarına bağlı olarak önemli oranda değişmektedir. Bununla birlikte, sıvı haldeki odun sirkesinde su oranı %80-90 arasında değişmektedir. Sudan sonra en baskın bileşen asetik asit olup bunu

diğer asitler, alkoller, fenoller, esterler, karbonil, furanlar ve diğer organik bileşenler takip etmektedir (Birol and Günal, 2022). Odun sirkesi, asetik asit, metanol, fenol, ester, asetal, keton, formik asit ve diğer pekçok organik olmak üzere 200'den fazla kimyasal içermektedir (Kadota and Nimii, 2002, Namlı et al., 2014).

Günümüzde 128'i Çin'den olmak üzere 189 odun sirkesi ürünü ticari olarak pazarlanmaktadır. Odun sirkesi bazlı pestisit, Japonya'da ve Tayland, Kamboçya ve Çin gibi diğer birçok Asya ülkesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Birol and Günal, 2022). Ülkemizde ise odun sirkesi kullanımı ve satışı uzakdoğu ülkelerine göre oldukça düşüktür.

Son yıllarda tarımsal üretimde toprak düzenleyici, antibakteriyel, antifungal, organik gübre, çimlenme ve fide büyümesini destekleyici olarak odun sirkesi de araştırmalara konu olmaktadır. Odunun kömüre dönüştürülmesi için uygulanan atık biyokütle pirolizi sırasında oluşan, yoğunlaştırılmış buhardan elde edilen, sıvı bir yan ürün olan odun sirkesi yüksek oranda asetik asit içermektedir (Namlı et al., 2014; Koç et al., 2017; Birol and Günal, 2022).

Biyokütlenin yavaş pirolizi sonucu çıkan ürünlerin oranları, biyokütle türüne, nemine, piroliz tekniği ve sıcaklığına göre farklılıklar göstermekle beraber ortalama bir değer verilecek olursa %35 civarında biyokömür, %30 oranında piroliz sıvısı ve %35 civarında ise yoğunlaştırılamayan gazdır (Bridgwater, 2008).

Odun sirkesi, bitki biyokütlesinin selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi bileşenlerinin termokimyasal parçalanmasından kaynaklanan karmaşık bir sıvı fraksiyondur. Araştırmacılar, odun sirkesi içerisinde 200'den fazla bileşen olduğunu rapor etmişlerdir (Theapparat et al., 2018).

Odun sirkesi üretiminde tortu giderimi ve saflaştırılmasında sedimantasyon, filtrasyon, kromatografi, damıtma ve solvent ekstraksiyonu gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır.

En doğal ve yaygın kullanılan yöntem doğal çökeltme

(sedimentasyon) yöntemidir. Bu yöntemde piroliz sıvısı kapalı kapta en az 3 ay gibi bir sürede bekletilir. Bu süre içerisinde sıvıdaki kararsız bileşenler oksitlenir veya polimerize olur ve kabın iç duvarına çökelir ve yapışır. Sıvının üst yüzeyinde ince bir yağ tabakası, ortasında olgunlaştırılmış odun sirkesi, alt katmanda ise katran bulunur. Orta katman boşaltılarak şeffaf ve stabil odun sirkesi elde edilmiş olur (Fagernas et al., 2012; Ouattara et al., 2023).

Bitkisel üretimde dünya genelinde yüksek verim düşüklüğüne neden olan biyotik ve abiyotik stres faktörlerinin olumsuz etkilerini minimize etmeye yönelik biyoaktif bileşenlerce zengin odun sirkelerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Tarım ve ormancılık faaliyetleri sonucu ortaya çıkan biyokütle kalıntılarının yakılması, toprak canlılarını olumsuz etkileyerek toprağın bozulmasına yol açmakta ayrıca çok sayıda partikül, uçucu organik karbon ve yarı uçucu organik karbon bileşikleri, kül, sülfat aerosolleri ve eser gazlar da atmosfere salınmaktadır. Bu kirleticiler, küresel iklim değişikliğinin artması, biyolojik çeşitliliğin yok olmasının yanı sıra sosyo-ekonomik ve sağlık sorunları gibi küresel ölçekte birçok problem ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, biyokütlenin yanmasını veya çürütülerek yok edilmesini en aza indirmek ve bunun yerine düşük maliyetli kirlilik azaltma ve onu faydalı biyo ürünlere dönüştürmek için sürdürülebilir teknolojiler geliştirmek önemlidir (Grewal et al., 2018). Küresel ve bölgesel olarak çevre kirliliğini azaltmanın bir yolu, biyokütlenin piroliz, karbonizasyon, gazlaştırma ve süper kritik sıvı ekstraksiyonu gibi çeşitli işlemlerle gaz, sıvı ve katı yakıtlara dönüştürülmesidir (Crepier et al., 2018; Akkurt et al., 2020; Birol and Günal, 2022).

Odun sirkesinin biyotik ve abiyotik stres faktörlerine karşı etkinliğinin içerdiği asetik asit ve salisilik asit miktarı ile doğru orantılı olduğu varsayılmaktadır. Bu sebeple ülkemizde meşe ağacı odunundan mangal kömürü üretiminde yan ürün olarak ortaya çıkan meşe odun sirkesi ile salisilik asit içerdiği bilinen söğüt ve kavak odunundan elde edilen odun sirkelerinin asetik asit ve salisilik asit

içerikleri araştırılarak yüksek miktarda bulunan odun sirkelerinin üretiminin ve kullanımının yaygınlaştırılması amacıyla bu çalışma yapılmıştır.

Materyal ve Metot

Odun sirkesi üretimi

Odun sirkesi üretiminde meşe (*Quercus robur*) odunu ile salisilik asit içerdiği varsayılan söğüt (*Salix alba*) ve kavak (*Populus alba*) odunları materyal olarak kullanılmıştır. Bu türler ülkemizde yaygın olarak bulunmaktadır. Araştırmada farklı (meşe, söğüt ve kavak) ağaçlarından elde edilen odun parçaları yavaş piroliz yoluyla karbonizasyona tabi tutulmuştur.

Piroliz, biyokütleden oksijensiz ortamda organik moleküllerin parçalanmasıyla gaz elde etme işlemidir. Yavaş piroliz, odunun havasız ortamda ve sabit yatak reaktörlerde, 300 °C civarındaki sıcaklıklarda, uzun ısıtma zamanlarında katı ve sıvı ürünlere dönüştürülmesidir.

Bu işlem sırasında ortaya çıkan duman 80 ile 180ºC arasında sıcaklığa ulaşmaktadır. Bu duman soğutulduğunda, pirolignoz sıvısına dönüşmektedir. Bu sıvı, yoğunlukları birbirinden farklı olan üç katmandan oluşmaktadır. En üst katmanda yağlı bir sıvı, orta kısımda ham odun sirkesi olarak adlandırılan şeffaf, sarımsı kahverengi bir tabaka, en alt katman ise katran bulunmaktadır.

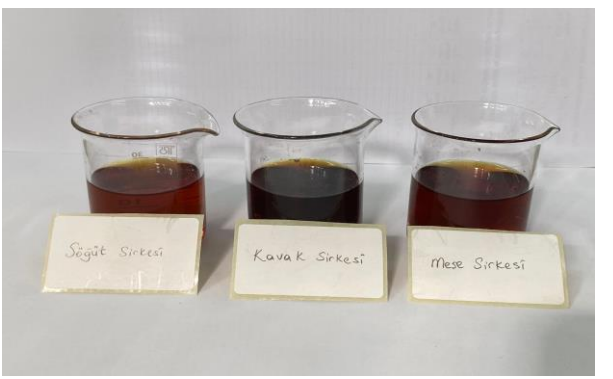
S.Ü. Çumra Uygulamalı Bilimler Yüksekokulunda yer alan yavaş piroliz sisteminde sabit yataklı karbonizasyon kısmında 40-50 kg odun kapasiteli sepet bulunmaktadır. Bu kısma odunlar yerleştirildikten sonra kapak hava almayacak şekilde kapatılmakta ve kazanın altından odun yakılarak ısıtma yapılmaktadır. Yeterli sıcaklığa ulaşınca gazlaşma başlamakta ve çıkan bu duman birinci ve ikinci sulu siklon soğutma ünitelerinden geçirilerek yoğunlaştırılmaktadır. Yoğunlaştırılamayan gaz yakma ünitesine

verilerek tekrar yakılmaktadır. Her iki sulu siklon soğutma ünitesinin alt kısmına yerleştirilen musluklardan yoğunlaştırılmış piroliz sıvısı akışı gerçekleşmektedir. Bu işlem yaklaşık 5-6 saat sürmektedir. Duman çıkışı bittiğinde sistem yaklaşık 12 saat soğumaya bırakılarak sepetteki biyokömür alınmaktadır. Elde edilen biyokömür ve piroliz sıvısı oranları ürüne göre değişiklik göstermekle beraber yaklaşık %35 oranında biyokömür ve %30 oranında piroliz sıvısı elde edilmektedir (Şekil 1).

Şekil 1. Yavaş piroliz sistemi



Şekil 2. Sedimentasyonu tamamlanmış odun sirkeleri



Odun sirkesi sedimantasyonu

Araştırmamızda doğal çökeltme (sedimentasyon) yöntemi kullanılmıştır. Odun sirkesi üretiminde tortu gideriminde en doğal ve yaygın kullanılan yöntem doğal çökeltme (sedimentasyon) yöntemidir. Bu yöntemde piroliz sıvısı kapalı kapta en az 3 ay gibi bir sürede bekletilir. Bu süre içerisinde sıvıdaki kararsız bileşenler oksitlenir veya polimerize olur ve kabın iç duvarına çökelir ve yapışır. Sıvının üst yüzeyinde ince bir yağ tabakası, ortasında olgunlaştırılmış odun sirkesi, alt katmanda ise katran bulunur. Orta katman boşaltılarak şeffaf ve stabil odun sirkesi elde edilmiş olur (Şekil 2).

Odun sirkelerinin analizi

Araştırma bütçesi sınırlılığı nedeni ile odun sirkelerinin biyoaktif içeriklerini belirlemeye yönelik sadece asetik asit (GC-FID metot) ve salisilik asit (HPLC-Metot) miktarları analizi akredite edilmiş dış laboratuvardan hizmet alımı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Okulumuz laboratuvarında mevcut pH, EC ölçer ve el tipi refraktometre cihazları ile araştırmada elde edilen odun sirkelerinde pH, EC ve Brix˚ ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3 ve 4).

Şekil 3. Odun sirkelerinde pH ve EC ölçümü



Şekil 4. Odun sirkelerinde refraktometre ile brix˚ ölçümü



Bu çalışma ile farklı (meşe, söğüt ve kavak) materyallerinden elde edilen odun sirkelerinin bazı temel fizikokimyasal özellikleri (pH, EC, Brix, asetik asit ve salisilik asit içerikleri) belirlenmiştir (Tablo 1).

Bulgular ve Tartışma

Elde edilen pH değerleri incelendiğinde, 1.8 ile 2.7 aralığında değiştiği görülmektedir. En düşük (1.7) pH değeri söğüt, en yüksek (2.7) pH değeri ise meşe odun sirkesinde belirlenmiştir (Tablo 1). Kavaktan elde edilen odun sirkesinin pH değeri ise 2.1 olarak saptanmıştır. Bu sonuçlar, odun sirkelerinin yüksek asetik asit, formik asit ve propionik asit gibi zengin organik asit içerikleri nedeniyle güçlü asidik karakter gösterdiğini bildiren diğer çalışmalarla uyumludur (Ouattara ve ark., 2023; Aguirre ve ark., 2021). Odun sirkeleri düşük pH özellikleri ile organik bikisel üretimde pH düşürücü olarak hem yapraktan hemde topraktan yapılan uygulamalarda kullanılmaktadır.

Elektriksel iletkenlik (EC) değerleri 0.78–1.27 dS/m arasında değişmiştir. En düşük (0.78) EC değeri söğütten üretilen odun sirkesinden elde edilirken meşe ve kavaktan elde edilen odun sirkelerinin EC değerlerinin birbirne yakın olduğu görülmektedir (sırasıyla, 1.25 ve 1.27 dS/m, Tablo 1). Bu durum, biyokütlenin mineral içeriği ve piroliz sürecinde oluşan çözünmüş iyonik bileşiklerin farklılığından kaynaklanmaktadır. Lignoselülozik hammaddenin türü pirolizatların kimyasal kompozisyonunu doğrudan etkilemektedir (Mun ve ark., 2013).

Brix değerleri kavakta en yüksek (%10), söğütte en düşük (%4) olarak belirlenmiştir. Meşe odun sirkesinin brix değeri ise %7 olarak saptanmıştır (Tablo 1). Brix değeri, odun sirkesinde çözünmüş organik maddelerin (özellikle düşük molekül ağırlıklı organik bileşikler) miktarını göstermektedir. Kavak odun sirkesindeki yüksek brix değeri, bu materyalin piroliz sırasında daha fazla çözünür organik bileşik oluşturduğunu göstermektedir. Aynı zamanda brix değeri odun sirkelerinin katran içeriklerini gösteren genel indikatör olarak kullanılmaktadır. Araştırmada elde edilen brix değerleri, farklı ağaç türlerinin piroliz ürünlerinin bileşiminde önemli farklılıklar olduğunu ortaya koyan diğer çalışmalar ile uyumludur (Theapparat ve ark., 2018; Chungsiriporn ve ark., 2025).

Asetik asit açısından değerlendirildiğinde, en yüksek içerik kavak (%7.4), ardından meşe (%4.7) ve söğüt (%2.5) olarak belirlenmiştir (Tablo 1). Bu sonuçlar, lignoselülozik biyokütlenin pirolizinde hemiselülozun parçalanmasıyla oluşan asetik asidin, hammadde kompozisyonuna güçlü şekilde bağlı olduğunu göstermektedir. Asetik asit, odun sirkesinin ana bileşeni olup hem pH'yı düşürmekte hem de biyolojik aktiviteyi belirlemektedir. (Aguirre ve ark., 2021). Yin ve ark. (2024) küsküttten elde ettikleri odun sirkesinin biyoaktif içeriklerinin belirlemeye yönelik yaptıkları çalışmada odun sirkesinin ana bileşenlerinden birinin asetik asit olduğu ve miktarının kullanılan biyokütlenin kimyasal yapısına göre değiştiği vurgulanmışlardır. Kavakta yüksek asetik asit içeriği, bu

materyalin daha yüksek hemiselüloz oranına sahip olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca yüksek Brix değeri (%10) ile birlikte değerlendirilmesi, kavak odun sirkesinin daha yoğun organik bileşik içeriğine sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle kavak odun sirkesinin yüksek asetik asit içeriği, patojen baskılayıcı etkiler açısından kavak sirkesini diğerlerine göre ön plana çıkarabilir.

Tablo 1. Farklı materyallerden elde edilen odun sirkelerinin bazı fizikokimyasal analizleri

Materyal	**pH**	**EC (dS/m)**	**Brix (%)**	**Asetik asit (%)**	**Salisilik asit (mg/l)**
Meşe	2.7	1.25	7	4.7	11.0
Söğüt	1.8	0.78	4	2.5	10.9
Kavak	2.1	1.27	10	7.4	7.7

Salisilik asit içerikleri incelendiğinde, meşe (11.0 mg/L) ve söğüt (10.9 mg/L) odun sirkelerinde daha yüksek değerler elde edilirken, kavakta bu değer 7.7 mg/L olarak belirlenmiştir (Tablo 1). Meşe ve söğüt odunlarının lignin yapısının fenolik türevler üretmeye daha yatkın olması, bu yüksek salisilik asit içeriklerini açıklayabilir. Salisilik asit bitkilerde sistemik kazanılmış direnç (SAR) mekanizmasını aktive eden önemli bir fenolik bileşiktir ve bitkilerde stres toleransı ve savunma mekanizmalarında önemli bir sinyal molekülüdür. Bu nedenle, meşe ve söğüt odun sirkelerinin biyostimülant ve bitki savunma mekanizmalarını destekleyici etkiler açısından daha avantajlı olduğu değerlendirilmektedir (Wang ve ark., 2019). Fenolik bileşiklerin oluşumunda lignin yapısının ve aromatik öncüllerin belirleyici rol oynadığını ifade edilmektedir (Ouattara ve ark., 2020). Hassan ve ark. (2025) ada mimozası bitkisinde elde edilen odun sirkesinin antioksidan ve antimikrobiyal

özelliklerini belirlemeye yönelik yaptıkları çalışmada odun sirkesinde fenolik bileşikler ve salisilat türevlerinin önemli biyolojik aktiviteye sahip olduğu ve özellikle antioksidan ile antimikrobiyal etkilerde rol oynadığını belirtilmişlerdir.

Sonuç ve Öneriler

İncelenen parametreler birlikte değerlendirildiğinde, kullanılan lignoselülozik hammaddenin odun sirkesinin kimyasal kompozisyonu üzerinde belirleyici olduğu açıkça görülmektedir.

Tüm örneklerin düşük pH değerlerine sahip olması, odun sirkelerinin güçlü asidik karakterini doğrulamış ve bu ürünlerin tarımsal uygulamalarda pH düzenleyici olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Elektriksel iletkenlik değerlerindeki farklılıklar, biyokütlenin mineral içeriği ve piroliz sürecinde oluşan çözünmüş iyonik bileşiklerin değişkenliğinden kaynaklanmıştır.

Brix değerleri, odun sirkelerindeki çözünmüş organik madde miktarının önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Özellikle kavak odun sirkesinin yüksek Brix değeri ve buna paralel olarak yüksek asetik asit içeriği, bu materyalin daha yoğun organik bileşikler içerdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, kavak odun sirkesinin özellikle antimikrobiyal ve patojen baskılayıcı etkiler açısından daha etkili olabileceğini düşündürmektedir.

Salisilik asit içerikleri bakımından ise meşe ve söğüt odun sirkelerinin öne çıktığı belirlenmiştir. Bu bulgu, lignin yapısının fenolik bileşik oluşumundaki rolünü desteklemekte ve bu odun sirkelerinin bitki savunma mekanizmalarını (özellikle sistemik kazanılmış direnç, SAR) aktive etme potansiyelinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak; kavak odun sirkesi yüksek asetik asit ve brix değeri ile biyosidal etki açısından, meşe ve söğüt odun sirkeleri ise yüksek salisilik asit içerikleri ile biyostimülant ve bitki savunma mekanizmalarını destekleyici etkiler açısından ön plana çıkacağı

varsayılmaktadır. Bu sonuçlar, odun sirkesi üretiminde kullanım amacına göre uygun hammadde seçiminin önemli olduğunu göstermiştir.

Not: “Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir”

Kaynakça

Aguirre, J. L., Baena, J., Martín, M. T., Nozal, L., González, S., Manjón, J. L., & Peinado, M. (2021). Composition, ageing and herbicidal properties of wood vinegar obtained through fast biomass pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158, 105260.

Akkurt, B., Günal, H., Erdem, H., & Günal, E. (2020). Piroliz sıcaklığının biyoçarların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerine etkileri. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 8(1), 1–13.

Beyoğlu, S. (2022). *Asetik asit uygulamasının arpa (Hordeum vulgare L.) kromozomlarına etkileri* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.

Birol, M., & Günal, E. (2022). Odun sirkesinin tarımda kullanımı. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 596–608.

Borgen, A., & Nielsen, B. (2001). Effect of seed treatment with acetic acid in control of seed borne diseases. A. J. Slusarenko, R. S. Fraser, & R. L. Wastie (Ed.), *Proceedings of the BCPC Symposium No. 76: Seed treatment: Challenges and opportunities* içinde (s. 135–140). British Crop Protection Council.

Bridgwater, A. V. (2008). *Progress in thermochemical biomass conversion*. John Wiley & Sons.

Chungsiriporn, J., et al. (2025). Characterization of wood vinegar derived from different biomass sources and its agricultural applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*. https://doi.org/10.1007/s13399-024-XXXXX-X

Crepier, J., Le Masle, A., Charon, N., Albrieux, F., Duchene, P., & Heinisch, S. (2018). Ultra-high performance supercritical fluid chromatography hyphenated to atmospheric pressure chemical ionization high resolution mass spectrometry for the characterization

of fast pyrolysis bio-oils. *Journal of Chromatography B*, 1086, 38–46.

Dempsey, D. M. A., & Klessig, D. F. (2017). How does the multifaceted plant hormone salicylic acid combat disease in plants and are similar mechanisms utilized in humans? *BMC Biology*, 15, Makale 23.

Fagernäs, L., Kuoppala, E., Tiilikkala, K., & Oasmaa, A. (2012). Chemical composition of birch wood slow pyrolysis products. *Energy & Fuels*, 26(2), 1275–1283.

Grewal, A., Abbey, L., & Gunupuru, L. R. (2018). Production, prospects and potential application of pyroligneous acid in agriculture. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 135, 152–159.

Gümüş, Y. (2021). *Bazı söğüt ve kavak ağaçlarında salisilik asit ekstraksiyonu ve tayini* [Yüksek lisans tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.

Hassan, N. A., Badr, M. M., Taktak, N. E. M., Aly, H. M., & Badawy, M. E. I. (2025). Phytochemical constituents, antioxidant and antimicrobial activities of wood vinegar and its nanoemulsions. *Industrial Crops and Products*, 223, 119850.

Kadota, M., Hirano, T., Imizu, K., & Niimi, Y. (2002). Pyroligneous acid improves in vitro rooting of Japanese pear cultivars. *HortScience*, 37(1), 194–195.

Karaşahin, M. (2022). Biyostimulant olarak bitki ekstraktları ve çimlenmiş buğday tohumu ekstraktı. *Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi*, 11(2), 190–200.

Kim, J. M., To, T. K., Matsui, A., Tanoi, K., Kobayashi, N. I., Matsuda, F., Habu, Y., Ogawa, D., Sakamoto, T., Matsunaga, S., Bashir, K., Rasheed, S., Ando, M., Takeda, H., Kawaura, K.,

Kusano, M., Fukushima, A., Endo, T. A., Kuromori, T., & Seki, M. (2017). Acetate-mediated novel survival strategy against drought in plants. *Nature Plants*, 3(7), 17097.

Klessig, D. F., Choi, H. W., & Dempsey, D. M. A. (2018). Systemic acquired resistance and salicylic acid: Past, present, and future. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 31(9), 871–888.

Koç, İ., Yardım, E. N., & Yıldız, Ş. (2017). In vitro şartlarında küf etmenlerine karşı tavuk gübresinden elde edilmiş odun sirkesinin antifungal etkisi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 27(4), 516–520.

Li, Z., Wu, L., Sun, S., Gao, J., Zhang, H., Zhang, Z., & Wang, Z. (2019). Disinfection and removal performance for *Escherichia coli*, toxic heavy metals and arsenic by wood vinegar-modified zeolite. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 129–136.

Mun, S. P., Ku, C. S., & Kim, S. B. (2013). Chemical composition of pyrolysis products derived from lignocellulosic biomass. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(2), 543–547.

Namlı, A., Akça, M. O., Turgay, E. B., & Soba, M. R. (2014). Odun sirkesinin tarımsal kullanım potansiyelinin araştırılması. *Toprak Su Dergisi*, 3(1), 44–52.

Ouattara, H. A. A., Niamke, F. B., Yao, J. C., Amusant, N., & Garnier, B. (2023). Wood vinegars: Production processes, properties, and valorization. *Forest Products Journal*, 73(3), 239–249.

Theapparat, Y., Chandumpai, A., & Leelasuphakul, W. (2018). Chemical composition and antimicrobial activity of wood vinegar from various biomass sources. *Biomass and Bioenergy*, 115, 274–281.

Tiilikkala, K., Fagernäs, L., & Tiilikkala, J. (2010). History and use of wood pyrolysis liquids as biocide and plant protection product. *The Open Agriculture Journal*, 4(1), 111–118.

Utsumi, Y., Utsumi, C., Tanaka, M., Ha, C. V., Takahashi, S., Matsui, A., Matsunaga, T. M., Matsunaga, S., Kanno, Y., Seo, M., Okamoto, Y., Moriya, E., & Seki, M. (2019). Acetic acid treatment enhances drought avoidance in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Frontiers in Plant Science*, 10, Makale 816.

Wang, X., et al. (2019). Role of salicylic acid in plant stress tolerance and defense responses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 138, 112–118.

Yarsan, E., & Çevik, A. (2007). Vektör mücadelesinde biyopestisitler. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 64(1), 61–70.

Yin, D., Xue, R., Li, Y., Zhu, M., & Li, D. (2024). Valorization of plant extraction residues via pyrolysis for wood vinegar production and bioactive compound analysis. *Bioresource Technology*, 394, 130282.

Yüksel, A., & Aksoy, Ö. (2017). Su stresi koşullarında bitkilerde gözlenen değişimler. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 10(2), 1–5.

Zhang, F., Shao, J., Yang, H., Guo, D., Chen, Z., Zhang, S., & Chen, H. (2019). Effects of biomass pyrolysis derived wood vinegar on microbial activity and communities of activated sludge. *Bioresource Technology*, 279, 252–261.

BÖLÜM 4

ISIL İŞLEMİN ÇEŞİTLİ AĞAÇ TÜRLERİNDE KÜF MANTARI GELİŞİMİNE ETKİSİ

Ayhan AYTİN[1]
Coşkun KÖSE[2]
Cihat TAŞÇIOĞLU[3]

Giriş

Ağaç hammaddesi insanlığın ilk yıllarından beri yapı ve diğer maksatlarda olmak üzere kullanılagelmektedir (Bozkurt & Göker, 1996; Kurt et al., 2012). Hafif olmasına rağmen çeşitli dış etkilere karşı direncinin yüksek olması, kolay işlenmesi ve işlenmesi sırasında enerji tüketiminin az olması ve daha çok sayıda nedenden dolayı kullanılmaya aynı şekilde devam etmektedir (Kurtoğlu, 2000). Bunun yanında kolayca yenilenebilen ve geri kazanılabilen, aynı zamanda karbondioksit depolayan doğal bir kaynak olması, onu global boyutta önemli sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için

[1] Doç. Dr., Tasarım Bölümü, Düzce Meslek Yüksekokulu, Düzce Üniversitesi, Düzce Orcid: 0000-0002-7938-1111.
[2] Prof. Dr., Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orman Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul. Orcid: 0000-0003-4626-2236.
[3] Prof. Dr., Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orman Fakültesi, Düzce Orcid: 0000-0002-6770-8308.

önemli bir materyal ve alternatif haline getirmektedir (Akiner et al., 2022).

Ağaç malzeme birçok doğal malzemeye benzer şekilde herhangi bir koruma önlemi alınmadığı takdirde biyotik (canlı) ve/veya abiyotik (cansız) etkenler sonucu bozunmaya maruz kalmaktadır. Bu durum hizmet ömrünün kısalmasıyla kullanım yerindeki ahşaba yönelik büyük tehditler meydana getirmektedir. Ağaç malzemenin hizmet ömrünü uzatmak geliştirilen uygulamalardan biri termal modifikasyon (ısıl işlem)'dir. Daha uzun hizmet ömrüne sahip ağaç malzemenin elde edilmesi ile farklı ahşap ürünler için daha fazla hammadde kaynağı sağlanabilecektir. Isıl işlem uygulanarak doğal dayanıklılığı düşük olan ağaç malzemenin dayanıklı türlerin kullanımına göre çok daha ekonomik ve daha geniş bir kullanım alanına sahip olması sağlanabilmektedir (Köse et al., 2024; Kartal et al., 2024).

Bu bölümde, ısıl işlem ve küf mantarları hakkında temel bilgiler verilerek ısıl işlem uygulanmış ağaç malzemenin küf mantarlarına karşı performansı değerlendirilecektir.

Küf mantarları ve ağaç malzeme üzerine etkileri

Ağaç malzemede abiyotik ve biyotik faktörlerin etkisiyle bozunmalar oluşmaktadır. Abiyotik faktörler ağaç malzemede fotodegradasyon, oksidasyon reaksiyonları (açıkhava etkileri), termal bozunma, kimyasal bozunm ve mekanik eskimeye neden olmaktadır. Ağaç malzemede bozunmaya neden olan biyotik faktöreler, böcekler deniz organizmaları, bakteriler ve mantarlardır. Odunda yaşayan mantarlar çürüklük (esmer çürüklük, beyaz çürüklük ve yumuşak çürüklük) ve renklenmelere neden olmaktadır. Diri odun tabakasında renk değişikliğine neden olan renk mantarları yanında ağaç malzeme yüzeyiyle sınırlı gelişim göstern küfler renk değişikliğine neden olan diğer etmenlerdir (Zabel & Morrell, 1992; Bozkurt et al., 1995; Schmidt, 2006).

Küfler, dikili ağaçlarda, kesimden sonra yuvarlak odunların yüksek rutubetli diri odunlarında, depolama koşulları uygun olmayan kerestelerde, yeterince kurutulmamış ahşap ürünlerde, deniz veya karayolu taşınması sürecinde tomruk, kereste ve çeşitli ahşap ürünlerde (palet gibi), boyanmış ahşap yüzeylerde gelişerek malzeme yüzeyini hızla kaplamaktadır (Köse et al., 2024).

Taksonomik olarak tek bir sistematik grubu temsil etmeyen farklı 20.000-30.000 türü kapsayan küfler Ascomycetes ve Deuteromycetes (Fungi imperfecti) sınıflarına dahil edilmiştir. 1 m3 havada iklim koşullarına bağlı olarak 100 ila 1000 adet küf sporu bulunabilmekte, uygun şartlarda oluştuğunda ağaç malzemenin yüzeyine yerleşen sporların çimlenmeleri sonrasında hücrelere nüfuz gerçekleşmektedir. Küflerin odun dokusunda gelişimi sadece birkaç milimetrelik nüfuz derinliğiyle sınırlıdır. Renk mantarları gibi paranşim hücreleri içerisindeki şeker, protein ve diğer depo maddelerini besin kaynağı olarak kullanan küfler odun hücre çeperinde tahribata neden olmamaktadır (Köse et al., 2024). Mekanik özellikleri olumsuz etkilememekle birlikte görsel ve estetik açıdan olumsuzluk oluştururlar (Schilling et al., 2015). Küf mantarı türleri ve iklim koşullarına bağlı olarak birkaç günden birkaç aya kadar değişiklik gösterebilen döngülerle çok sayıda spor üreterek başka ahşap yüzeylere bulaşırlar. Ahşap yüzeyine bulaşmış sporlar basit müdahalelerle (fırçalanma, silme ve planyalama) yüzeyden uzaklaştırılsa bile rutubetli ağaç malzemede küfler yeniden spor üretebilmektedir (Zabel & Morrell, 1992; Erdin & Köse, 2004; Schmidt, 2006).

Küflerin gelişimi için gerekli en önemli faktörler besin maddesi, rutubet, oksijen ve sıcaklıktır. Lif doygunluğu noktası üzerindeki odun rutubeti odunda yaşayan diğer mantarlar gibi küfler için de en uygun ortamı oluşturmaktadır. %18 odun rutubeti faaliyet gösterdikleri alt sınırı oluşturmaktadır. 22-35 oC sıcaklık ve %45-

180 rutubet küfler için en uygun gelişme şartlarını sağlamaktadır (Erdin, 2009; Köse et al., 2024).

En çok siyah (Aspergillus spp.) ve yeşil renkte (Penicillium spp., Trichoderma spp.) görülen küflere rastlanmakla birlikte kırmızı ve diğer renklerde olanlar da görülebilmektedir. Bazı türler ise çıplak gözle ahşap yüzeylerde tespit edilememekte, ancak mikroskop ile incelendiğindesporları ya da miselyumları görülebilmektedir. (Zabel & Morrell, 1992; Köse et al., 2024).

Isıl işlem

Dünyanın pek çok bölgesinde kullanım alanları her geçen gün genişleyen ahşap, önemini ve değerini korumaktadır. İlerleyen teknoloji sayesinde ahşabın ikamesi olabilecek yeni malzemeler geliştirilse de doğal yapısı ve yenilikçi bir mühendislik gereci olarak çok sayıda alanda tercih edilmesi nedeniyle bu alternatifler ahşabın yerini alamamıştır. Ahşabın farklı nem oranlarında boyutsal değişime uğraması (çalışması), çeşitli biyolojik etkenlerden zarar görmesi, UV ışık altında renginin solması veya yağış gibi abiyotik faktörlerin yol açtığı fiziksel ve kimyasal değişimlerden etkilenmesi gibi olumsuzlukları gidermek amacıyla odunun yüksek sıcaklıklarda termal değişime tabi tutulmasına ısıl işlem (HT) adı verilmektedir (Hill, 2006).

Ağaç malzemenin ısıl işlem yolu ile modifiye edilmesine ilişkin ilk çalışmalar 1915 yılında Wisconsin, Madison'daki Orman Ürünleri Laboratuvarı'nda (Forest Products Laboratory) fırın uzmanı olarak çalışan Harry Tiemann'ın çalışmalarına kadar uzanmaktadır; Tiemann, hava kurusu ağaç malzemeyi 150 °C'deki kızgın buharda ısıtmış ve elde edilen ısıl işlem görmüş ağaç malzemenin higroskopikliğinde bir azalma olduğunu tespit etmiştir. Buna rağmen bu tarihten itibaren yaklaşık 60-70 yıllık bir süreçte yapılan birçok denemeye rağmen bu alanda beklenen gelişme sağlanamamıştır. Ancak 1990'lı yıllardan itibaren yapılan çalışmalar ve aynı zamanda

ticari koşulların elverişliliği sonunda ısıl işlem ile modifikasyonun hayata geçirilmesine olanak tanımıştır (Korkut & Kocaefe, 2009). Öte yandan gerek çevresel kaygılar ve gerek ise Avrupa Biyosidal Ürünler Direktifi gibi yasal düzenlemelerin yürürlüğe girmesi gelişimi desteklemiş, başlangıçta çeşitli Avrupa ülkelerinde Rétification, Thermowood, Menz Holz ve Plato Wood gibi üretim teknolojileri geliştirilmiştir (Hill et al., 2021). Bu ve benzeri üretim teknolojilerinin çıktısı olarak ısıl işlem uygulanmış ağaç malzemenin kullanım alanları; bina dış cephe kaplamaları, iç mekan kaplamaları, parke ve döşeme tahtaları. park ve bahçe mobilyaları, bahçe çitleri, çocuk oyun alanları, pencere doğraması ve pencere panjurları, iç ve dış kapı, sauna ve sauna elemanları, iç mekan mobilyaları, müzik aletleri yapımı, teraslarda döşeme malzemesi, pergola, tavan ve çatı altı kaplama ve banyo ve mutfak mobilyaları olarak örneklendirilebilir (Korkut & Kocaefe, 2009) . Sonuç olarak ağaç malzemeye ısıl işlem uygulaması, üretim hacminin 500.000 m^3'ü aşması birlikte köklü ve yerleşik bir ticari teknoloji haline gelmiştir (Jones et al., 2019).

Isıl işlem metodunun ana fikri kimyasal reaksiyonların hız kazandığı 150°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ahşabın ısı ile muamelesine dayanmaktadır (Johansson, 2005). Standart metni TS CEN/TS 15679/2010'e göre de ısıl işlem görmüş ağaç malzeme, hücre çeper bileşenleri ve fiziksel özellikleri 160°C'den daha yüksek sıcaklığa ve oksijen mevcudiyeti azaltılmış şartlara maruz bırakılarak dmodifikasyona uğramış odun olarak tanımlanmaktadır (Özyürek & Aytin, 2026). Esasında ağaç malzemede 150°C'nin altındaki sıcaklıklarda termal bozunma meydana gelmekte ve bu sıcaklığın altında ısıtılan ağaç malzemede de geri dönüşü olmayan değişimler meydana gelmektedir. Buna rağmen HT tanımlaması bu sıcaklığın üzerindeki işlemler için kullanılmaktadır. Benzer şekilde 240°C'nin üzerindeki sıcaklıklar içinde HT görmüş ağaç malzemeden bahsedilmemektedir. Çünkü bu seviyenin üzerinde

meydana gelen bozunma nedeniyle, süreç ticari açıdan elverişli olamayacak kadar şiddetli bir boyuta ulaşmaktadır.

Ticari olarak bakıldığında ısıl işlem görmüş ağaç malzeme üretiminin 160-240°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirildiği görülmektedir. Isıl işlem, ağaç malzemede boyutsal kararlılığı ve dayanıklılığı artırmak için kullanılan, yerleşmiş bir ticari teknoloji olarak dikkat çekmektedir. Isıl işlem ile doğal ağaç malzemeye göre daha koyu renkli, boyutsal kararlılığı ve mikrobiyolojik etkenlere karşı dayanıklılığı artmış bir malzeme elde edilmektedir. Bununla birlikte mukavemette, özellikle de kırılma direncinde önemli bir azalma meydana gelmekte, bu durum ısıl işlem görmüş ağaç malzemeyi birçok uygulamada başta taşıyıcı eleman olmak üzere kullanımını sorunlu hale getirmektedir (Hill et al., 2021).

Isıl işlemin ağaç malzeme özellikleri üzerine etkileri

Isıl işlem ağaç malzemenin birçok özelliği üzerine etki etmektedir. Temelde fiziksel özelliklerde ısıl işlem ile olumlu sayılan değişiklikler elde edilirken, mekanik direnç özellikleri için aynı durumun söz konusu olmadığı anlaşılmaktadır. Yapılan çalışma sonuçlarına göre ısıl işlemin ağaç malzeme özellikleri üzerine en başlıca etkisi boyutsal kararlılık üzerine olmaktadır. Hemiselülozlar (şekerlerin ve zayıf polimerlerin) ısıl işlem sonrası degrade olduğu ağaç malzeme neme karşı çok daha kararlı hale gelmekte, böylece daralma ve genişleme en aza inmektedir (Elsheikh et al., 2022). Bu sonuç ağaç malzemede ısıl işlem ile birlikte boyutsal stabilitenin artması şeklinde ifade edilmektedir. Isıl işlem görmüş ağaç malzemede bir diğer önemli değişim mantar çürümesine ve böcek zararlarına karşı dayanıklılığın artması şeklinde vuku bulmaktadır. Polisakkaritler mantarların ağaç malzemede faaliyet göstermelerini sağlayan besin maddeleri olarak bilinmektedir. Isıl işlem mekanizması ağaç malzemede polisakkaritleri büyük ölçüde parçalamaktadır (Esteves & Pereira, 2009). Isıl işlem aynı zamanda ağaç malzemenin görünüş özelliklerinde de önemli değişikliklere

sebep olmaktadır. Görünüş özelliklerindeki değişim ağaç malzeme renginin koyulaşması başlamakta, aynı zamanda daha homojen ve estetik bir kahverengi ton oluşmaktadır. İstenilen renk koyuluğuna ulaşabilmek için temel ısıl işlem şartlarında (sıcaklık ve süre) uygun ayarlamalarının yapılması gerekmektedir (Aytin et al., 2021). Boyutsal stabilite, biyodegradasyon ve renk değişimleri ısıl işlem uygulanan ağaç malzemelerdeki olumlu kazanımlar olarak ifade edilmektedir.

Isıl işlem görmüş ağaç malzemenin bazı fiziksel özelliklerinde meydana gelen olumlu kazanımlara rağmen, ekseriyetle mekanik özelliklerde kayıp meydana gelmektedir. Eğilme direnci, dinamik eğilme direnci, liflere dik çekme direnci gibi mekanik dirençler başlıca kayıpların yaşandığı ve dikkat çektiği özelliklerdir. Hücre çeperindeki yapısal bozunmalar nedeniyle ağaç malzemenin daha kırılgan (gevrek) hale gelmesi nedeni ile eğilme ve çekme direnci düşmekte taşıyıcı / konstrüktif yapı elemanlarında kullanımı önerilmemektedir (Aytin, 2025). Buna karşılık birçok çalışmada özellikle 210°C sıcaklığa kadar olan uygulamalarda liflere paralel basınç direnci ile sertlik değerinin arttığı belirtilmektedir (Aytin et al., 2022).

Isıl işlem uygulanmış olan ağaç malzemede hidrofobiklik artmaktadır. Bu durum ısıl işlem sonucu ağaç malzemede suyun bağlanmasını sağlayan serbest hidroksil gruplarının azalmasından kaynaklanmaktadır (Elsheikh et al., 2022).

Materyal ve Yöntem

Çalışmada kullanılan ağaç türleri Türkiye'de doğal olarak yetişmekte olan, orman ürünleri sanayisinde önemli kullanım ve potansiyeli olan *Populus tremula* L. (Titrek kavak, TK), *Fraxinus angustifolia* Vahl. (Sivri meyveli dişbudak, DYD), *Picea orientalis* L. Peterm. (Doğu ladini, DL) ve *Abies nordmanniana* subsp. *equi-trojani* (Asch. & Sint. ex Boiss.) Coode & Cullen (Kazdağı göknarı,

UG) türleri olarak TS 4176/1984'e göre seçilmiştir.

Ormanda tomruk boylarına ayrılan çalışma ağaçları ilk olarak 60 mm kalınlığında kenarları sulamalı (kabuklu) olacak şekilde keskin kesiş yöntemi ile biçilmiştir. Daha sonra kalaslardan boyut toleransları verilerek 26x100x600 mm (kalınlık x genişlik x uzunluk) ölçülerinde taslaklar hazırlanmış, 20±2°C ve %65±5 bağıl nemde hava kurusu hale gelinceye kadar bekletilmiştir. Ardından taslaklara ThermoWood® ile ısıl işlem uygulanmıştır. Elde edilen ThermoWood® panellerden küf mantarı denemelerine tabi tutulacak çalışma örnekleri her bir ağaç türünden 20 x 20 x70 mm (kalınlık x genişlik x uzunluk) ölçülerinde hazırlanmıştır. Çalışma da her bir ağaç için oluşturulan deneme deseni ve kısaltmaları Tablo 1'de "Deneme varyasyonları" ismi ile verilmiştir.

Tablo 1 Deneme varyasyonları

Varyasyon Adı	Sıcaklık (C°)	Süre (Saat)	Kısaltma
Kontrol	22	-	KO
TW1	190	1	TW1
TW2	212	1	TW2

Çalışma kapsamında küf mantarlarına karşı dayanıklılık deneyleri gerçekleştirilmiş; deneylerde *Aspergillus niger* Teight (Wilcox 117), *Penicillium resedanum* McLennan & Ducker (FS 67) ve *Trichoderma harzianum* Rifai (Hambi 2678) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ağaç türlerine ASTM D4445 (ASTM, 2012) standardına göre küf mantarlarına karşı biyolojik performans denemeleri gerçekleştirilmiştir. Küflenmenin etkinliğinden emin olmak için ayrıca sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) diri odunun hazırlanan kontrol örnekleri kullanılmıştır.

Stok kültürlerden %2'lik malt agar besi ortamında petri kaplarında geliştirilen bu üç mantarın 2 haftalık kültürlerinin yüzeylerinden 10-15 mL steril deiyonize (DI) su ile yıkama yapılarak spor süspansiyonu hazırlanmıştır. Yıkama suları bir sprey

şişesinde birleştirilmiş ve yaklaşık 100 mL'lik nihai bir hacme kadar DI su ile yaklaşık 3×10^7 spor mL^{-1}'lik bir spor konsantrasyonu elde edilecek şekilde seyreltilmiştir.

Test örnekleri yüzeyine 1 mL küf sporu süspansiyonu püskürtülmüş, ardından dört hafta boyunca 27 °C sıcaklıkta ve %80 bağıl nemde inkübasyona tabi tutulmuştur. Her bir inkübasyon periyodu ardından (her hafta) küf gelişimi 0-5 derecelendirme ölçeği kullanılarak görsel olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme; 0 görünür küf büyümesinin olmadığını, 1 = %20, 2 = %40, 3 = %60, 4 =%80 ve 5 ise yüzeyin tamamen (%100) küf oluşumuyla kaplandığını ifade etmektedir.

Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında DYD, TK, DL ve UG ağaç örneklerine gerçekleştirilen dört hafta süreli küf testlerine ilişkin sonuçlara çoklu varyans analizi (ÇVA) yapılmış ve sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 Çalışma sonuçlarına ilişkin ÇVA sonuçları

Faktör	Kareler toplamı	Df	Kareler ortalaması	F	Önem	Faktör etkisi
Hafta (H)	5.523	3	1.841	116.700	0.00	0.879
Ağaç türü (AT)	37.851	3	12.617	799.813	0.00	0.980
Varyasyon (HT)	35.149	2	17.575	1114.08	0.00	0.979
H * AT	1.365	9	0.152	9.615	0.00	0.643
H * HT	0.363	6	0.061	3.837	0.00	0.324
AT * HT	97.250	6	16.208	1027.46	0.00	0.992
H * AT * HT	7.628	18	0.424	26.863	0.00	0.910
Hata	0.757	48	0.016			

Tablo 2'e göre dört haftalık sürece küflenme testine tabi tutulan DYD, TK, DL ve UG ağaç örneklerinde H, AT ve HT faktörlerinin küflenme üzerine etkili oldukları anlaşılmıştır. Faktör etkilerine bakıldığında en yüksek etkinin oldukça yüksek olmak üzere 0.980 ile AT ve 0.979 ile HT'de olduğu belirlenmiştir. Çalışma ile ilgili faktörlerin etkileşimin de küflenme oluşumu üzerinde etkili

olduğu, AT ve HT faktörleri arası etkileşiminin tüm etki faktörleri içerisinde 0.992 ile en yüksek değeri aldığı; yine AT, HT ve H faktörleri etkileşiminin de 0.910 ile aynı şekilde oldukça yüksek olduğu görülüştür. Çalışma kapsamında dört haftalık süre yapılan küf denemeleri ile ortaya çıkan etkinin HT, H ve AT faktörleri bakımından farklılaşma düzeyini belirlemek için her üç faktör için sonuçlara homojenlik testi (Duncan) testi uygulanmış ve homojenlik grupları (HG) oluşturulmuştur. Homojenlik testi sonuçları Tablo 3'te aritmetik ortalamalar (AO) ile birlikte verilmiştir. Homojenlik grupları büyük harfler ile ifade edilmiştir.

Tablo 3 Hafta, HT ve AT'ne ilişkin homojenlik testi sonuçları

AT	AO	HG	H	AO	HG	HT	AO	HG
UG	2.48 (1.00)*	A	1	3.15 (1.00)	A	KO	4.01 (1.00)	A
DYD	3.59 (1.00)	B	2	3.50 (1.00)	B	TW1	3.89 (1.00)	B
DL	4.01 (0.73)	C	3	3.68 (1.00)	C	TW2	2.67 (1.00)	C
TK	4.02 (0.73)	C	4	3.77 (1.00)	D			

*Parantez içerisindeki değerler P≥0.05 düzeyinde önem derecesini ifade etmektedir.

Tablo 2'e göre dört haftalık süre boyunca küflenme testine tabi tutulan DYD, TK, DL ve UG ağaç örneklerinde H, AT ve HT faktörlerinin küflenme üzerine etkili oldukları anlaşılmıştır. Faktör etkilerine göre test süresi uzadıkça her bir haftanın küflenmeyi artırdığı ve bir önceki haftadan farklılaşma meydana getirdiği görülmektedir. Aynı şekilde KO ve HT varyasyonları da küflenme üzerinde etkili olmakta, HT sıcaklık artışına bağlı olarak küflenmenin daha düşük seyrettiği anlaşılmaktadır. Küf mantarlarının etkisinin AT'ne bağlı olarak da değiştiği Tablo 3'de ayrıca görülmektedir. Ağaç türü, H ve HT'e göre küflenmeye ait seyir Tablo 4'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

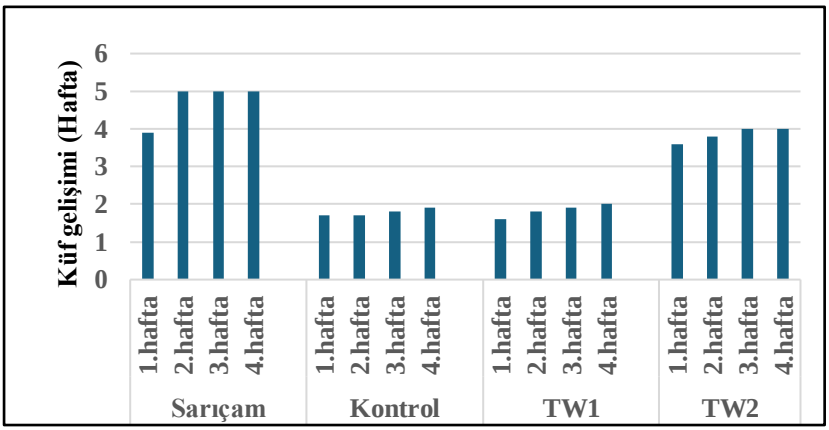
Tablo 4 Dört haftalık test sonucunda tüm varyasyonlara ilişkin küflenme değerleri

AT	HT	1.Hafta		2.Hafta		3.Hafta		4.Hafta	
		AO	SD*	AO	SD	AO	SD	AO	SD
DYD	KO	5.00	0.21	5.00	0.70	5.00	0.14	5.00	0.04
	TW1	4.20	0.14	4.80	0.14	5.00	0.07	5.00	0.02
	TW2	0.90	0.14	1.00	0.14	1.10	0.07	1.10	0.14
DL	KO	3.30	0.14	5.00	.014	5.00	0.14	5.00	0.02
	TW1	4.80	0.14	4.00	.070	5.05	0.14	5.00	0.01
	TW2	2.50	0.14	2.80	0.14	2.80	0.07	2.90	0.07
TK	KO	4.40	0.14	4.40	0.14	5.00	0.21	5.00	0.35
	TW1	3.80	0.14	5.00	0.02	4.20	0.07	4.20	0.14
	TW2	2.00	0.14	2.70	0.14	3.40	0.07	4.20	0.07
UG	KO	1.70	0.14	1.70	0.07	1.80	0.02	1.90	0.14
	TW1	1.60	0.07	1.80	0.02	1.90	0.02	2.00	0.14
	TW2	3.60	0.14	3.80	0.14	4.00	0.01	4.00	0.14

*SD: Standart sapma.

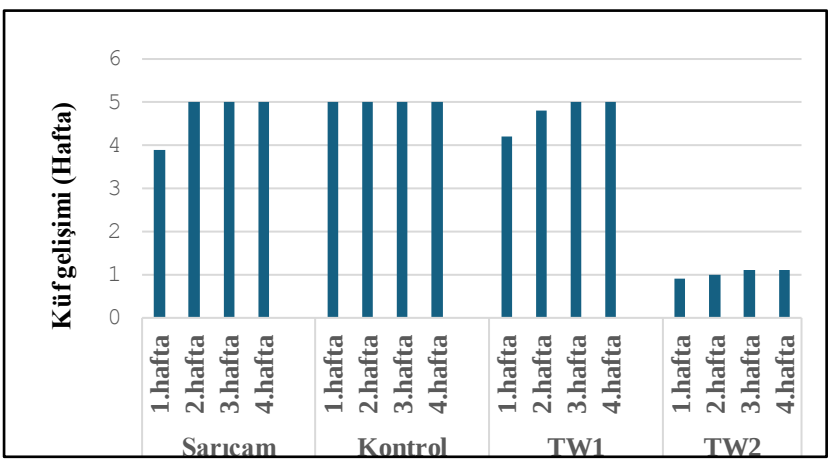
Tablo 4'e göre iki farklı sıcaklık derecesinde bir saat süre ile HT uygulanmış UG, DYD, TK, DL ve KO'nin küf mantarlarına karşı performansı sırası ile Şekil 1, 2, 3 ve 4'te verilmiştir. Küf gelişim oranları 7, 14, 21 ve 28 günlük inkübasyon süreleri sonunda görsel olarak derecelendirilmiştir (Şekil 5). Referans olarak kullanılan sarıçam diri odun örneklerinin yüzeyleri tamamen küf mantarlarıyla kaplanmış (Küf gelişim oranı: 5) olması denemelerde kullanılan küf mantarlarının aktif olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma sonuçlarına yapılan ÇVA (Tablo 2), homojenlik testi (Tablo 3) ve tüm varyasyonlara ait küflenme değerlerine (Tablo 4) göre ağaç türlerinin küflenme etkisinin farklılaştığı görülmektedir. Örneğin UG'da, gerek KO gerek ise TW1 örneklerinin referans olarak alınan Sarıçam örneklerinden farklı davranış sergiledikleri anlaşılmaktadır (Şekil 1).

Şekil 1 Kazdağı göknarı odununda ortalama küf gelişim oranları

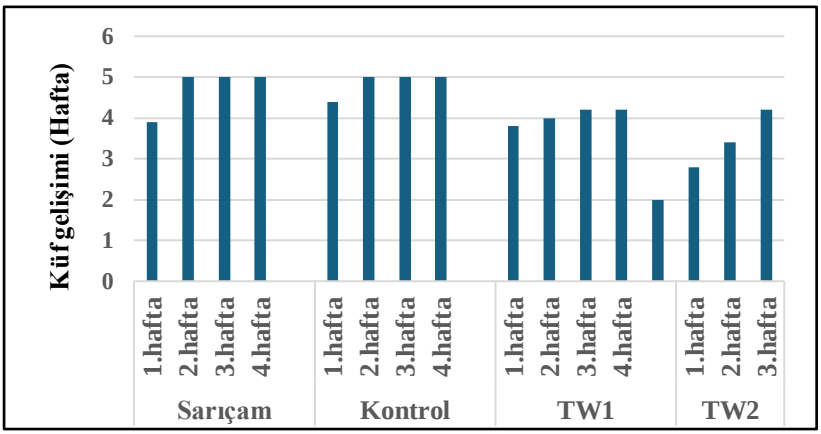


Şekil 1'e göre referans örneklerde ilk haftadan itibaren hızlı bir yayılma gösteren küf mantarlarının, kontrol ve TW1 varyasyonlarında aynı etkiyi göstermedikleri belirlenmiştir. Dişbudak ağacında küf yayılması KO ve TW1 varyasyonları neredeyse referans ağacı ile aynı iken, TW2'de 4 haftalık süre sonunda dahi başlangıç düzeyinde kalmıştır. Benzer durum DL'nde de görülmüştür (Şekil 2 ve 3).

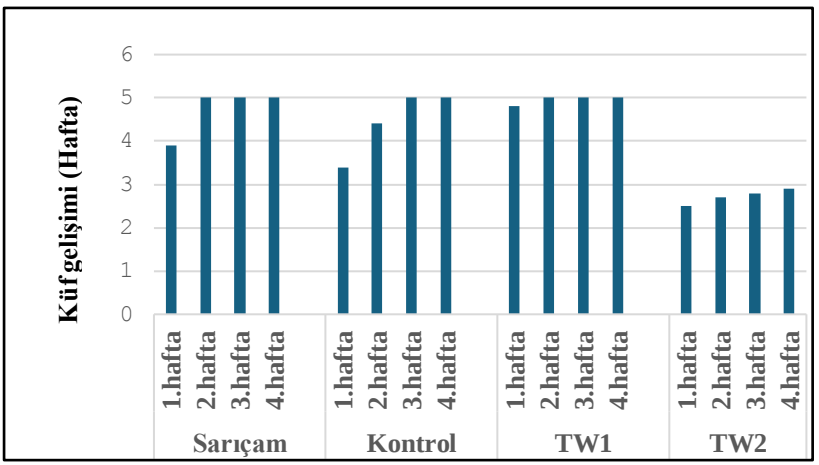
Şekil 2 Sivri meyveli dişbudak odununda ortalama küf gelişim oranları



Şekil 3 Titrek kavak odununda ortalama küf gelişim oranları



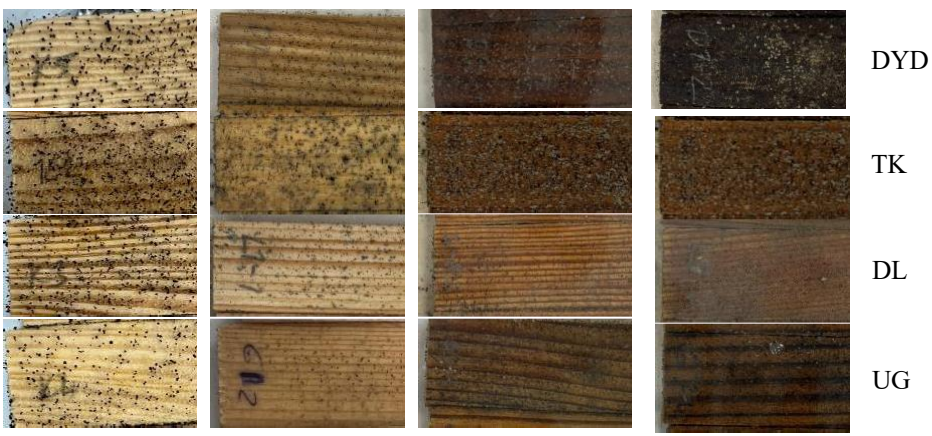
Şekil 4 Doğu ladini odununda ortalama küf gelişim oranları



Çalışma kapsamında HT uygulanmış dört farklı ağaç üzerinde dört haftalık küflenme testinin sonuçlarını belirlemek ana amaç olarak belirlenmişti. Çalışma sonuçlarına göre Şekil 1…4'te görüldüğü üzere dört haftalık süre boyunca HT küf mantarı gelişimini etkilemekte ve gelişim hızını yavaşlatmaktadır. Isıl işlem sonrası ağaç malzemenin küflenmeye karşı performansı değişik çalışmalarda da ortaya konulmuştur. Bu çalışmalarda odun yüzeyindeki küflenme riskinin düşük molekül ağırlığına sahip

karbonhidrat ve azot gibi ulaşılabilir besin maddelerinin miktarı ile ilişkili olduğu, bu besin maddelerinin yüksek sıcaklıklarda bozulmasının ısıl işlem uygulanmış odun yüzeyinde küf gelişiminin yavaş olmasının nedeni olarak ifade edilmiştir (Kocaefe et al, 2008; Yilgör & Kartal, 2010; Ahmed e al., 2013; Dilmaç, 2018; Kamperidou, 2019). Öte yandan küf mantarlarının gelişim hızı yavaşladığı görülse de TW2 dahil olmak üzere tüm varyasyonlarda meydana gelen mantar yayılması, küflenmeye karşı etkili bir korumanın sağlanamadığını göstermektedir. Ağaç malzemenin servis ömrünün uzunluğu dikkate alındığında durumun hassasiyetini göz ardı etmek mümkün görülmemektedir. Yapılan diğer bazı çalışmalarda HT uygulanmış olsa dahi, küflenmenin HT sırasında ağaç malzeme yüzeyindeki hemiselülozların hidrolize olarak oligomerik ve monomerik yapılara (serbest şekerlere) dönüşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Carrasco & Roy, 1992; Tjeerdsma & Militz, 2005; Boonstra et al., 2007). Isıl işlem uygulanmış DYD, DL, TK ve UG ağaçlarına ait görseller referans sarıçam örnekleri ile birlikte Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil 5 Dört haftalık inkübasyon sonucunda oluşan küf gelişimine ilişkin görseller Küf gelişim oranlarına ilişkin görseller



Sonuç ve Öneriler

Çalışmada Türkiye doğal olarak yetişmekte olan, orman ürünleri sanayinde önemli kullanım alanı bulunan ve aynı zamanda potansiyel teşkil eden Titrek kavak (*Populus tremula* L.), Sivri meyveli dişbudak (*Fraxinus angustifolia* Vahl.), Doğu ladini (*Picea orientalis* L. Peterm.) ve Kazdağı göknarı (*Abies nordmanniana* subsp. *equi-trojani* (Asch. & Sint. ex Boiss.) Coode & Cullen) türleri kullanılmıştır.

Çalışma bulgularına yönelik elde edilen sonuçlar, Thermowood® ile ısıl işlem uygulanmış dört farklı ağaç türünde küf gelişiminin benzer olmakla birlikte dört haftalık süre içerisinde ve sonunda az da olsa farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Farklılıklar hem ısıl işlemde uygulanan sıcaklık, hem de küflenme testi süresi ve hem de ağaç türü bakımından farklılık göstermiştir.

Ancak bilindiği üzere herhangi bir amaç için çeşitli ortam koşullarında kullanılacak ağaç malzemeden ekseriyetle oldukça uzun yıllar boyunca kullanımda kalması beklenmektedir. Çalışmada kullanılan süre bakımından karşılaştırma yapıldığında, küflenmeye karşı ayrıca bir önlem alınmadığı takdirde ısıl işlemin tek başına küflenme etki şartlarına karşı etkili olamayacağı açıkça görülmektedir. Açıklanan nedenden dolayı ısıl işlem uygulanmış ağaç malzemelerin kullanımında, herhangi bir olumsuzluk ile karşılaşmamak uğruna gerekli tedbirlerin alınması gerekmektedir.

Bununla birlikte özellikle ısıl işlem şartları ve ağaç türü dikkate alınarak, dört haftalık çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar üzerinden gidilmek sureti ile küflenmeye karşı daha olumlu sonuçların alınmasının mümkün olabileceği gerçeği de göz ardı edilmemektedir.

Kaynakça/References

Ahmed, S. A., Yang, Q., Sehlstedt-Persson, M., & Morén, T. 2013.Accelerated mold test on dried pine sapwood boards: impact of contact heat treatment. Journal of wood chemistry and technology, 33(3), 174-187.

Akiner, M., Akiner, İ., Akiner, N., & Pancovska, V. (2022). Using wood as a new generation building material in the context of sustainable development Korišćenje drveta kao građevinskog materijala nove generacije u kontekstu održivog razvoja. Materials Protection, 63(1)).

ASTM, 2012, Standart Test Method for Fungicides for ControllingSabstain and Mold on Unseasoned Lumber (Laboratory Method), Destination D-4445-10, Virginia Polytechnic Institue pursuant to Licence Agreement.

Aytin, A., Çakicier, N., Çiftçi, S., & Akter, M. (2021). Effect of water based varnish color barrier on color change and hardness in natural wood coating.

Aytin, A. (2025). The Effect of Hygroscopic Wood Structure on Some Properties of Heat Treated Products Formed with the Thermowood Method. BioResources, 20(2), 4187.

Aytin, A., Çakıcıer, N., & Birtürk, T. (2022). Chemical, hygroscopic, and mechanical properties of various wood species heat treated via the ThermoWood® method. BioResources, 17(1), 785-801. doi:https://doi.org/10.15376/biores.17.1.785-801.

Boonstra, M.J., Acker, J.V.i Kegel, E.i Stevens, M. 2007. Optimization of a two-stage heat treatment process: Durability aspects. Wood Sci. Technol. 41, 31–57.

Bozkurt Y., Erdin N., Ünligil, H. 1995 Odun Patolojisi Ders Kitabı, Üniversite Yayın No:3878, fakülte yayın No432, ISBN975-404-403-1İ.Ü.Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul 1995).

Bozkurt T., Göker Y., Orman Ürünlerinden Faydalanma Ders Kitabı, 3946, 437, 975-404-422-8, İstanbul 1996.

Carrasco, F., Roy, C., 1992. Kinetic study of dilute-acid prehydrolysis of xylan-containing biomass.Wood Sci.Technol. 26(3), 189–208.

Dilmaç, M.T. 2018. Termal modifikasyon ve yüzey işlemi uygulanmış ahşabın abiyotik ve biyotik etkenlere karşı performansı. Yüksek lisans Tezi Danışman Prof. Dr. Coşkun KÖSE, İÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Elsheikh, A. H., Panchal, H., Shanmugan, S., Muthuramalingam, T., El-Kassas, A. M., & Ramesh, B. (2022). Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly assessment. Cleaner Engineering and Technology, 8, 100450.

Erdin, N., Köse, C. (2004). Küf mantarlarının boyanmış ahşap yüzeylere etkileri. İ.Ü Orman Fakültesi Dergisi. Seri B, 54(2):43-60.

Erdin, N. (2009). Ahşap Konservasyonu. İÜ Yayın No: 4840, Orman Fakültesi Yayın No: 492. ISBN: 978-975-404-842. 137 s.

Esteves, B. M., & Pereira, H. M. (2009). Wood modification by heat treatment: a review. BioResources, 4(1), 370. 39

Hill, C. A. S., 2006, Wood modifications: Chemical, Thermal, and other Processes. John Wiley and Sons Inc., ISBN-10:0-470-02172-1.

Hill, C., Altgen, M. & Rautkari, L. Thermal modification of wood a review: chemical changes and hygroscopicity. J Mater Sci 56, 6581–6614 (2021). https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z.

Johansson D. (2005). Strenght and colour response of solid wood to heat treatment (Licentiate Thesis). Luleå Teknoloji Üniversitesi, Department of Skellefteå, Sweden.

Jones D, Sandberg D, Goli G, Todaro L (2019) Wood Modification in Europe: a state-of-the-art about processes, products and applications. Firenze University Press.

Kamperidou, V. 2019. The biological durability of thermally- and chemically-modified black pine and poplar wood against basidiomycetes and mold action. Forests, 10(12), 1111.

Kartal, S.N. Terzi, E. Köse, C. (2024). Ahşabın Korunması. T. Akbulut (Ed.), Ahşap: Doğal ve yenilenebilir mühendislik malzemesi içinde (s. 154-185) İstanbul: İÜC Üniversite Yayınevi.

Kocaefe, D., Shi, J. L., Yang, D. Q., & Bouazara, M. 2008. Mechanical properties, dimensional stability, and mold resistance of heat-treated jack pine and aspen. Forest Products Journal, 58(6), 88.

Korkut, S., & Kocaefe, D. (2009).Isıl işlemin odun özellikleri üzerine etkisi. Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi, 5(2), 11-34.

Köse, C., Kartal, S.N., Terzi, E. (2024). Ahşabın Bozunması, T. Akbulut (Ed.), Ahşap: Doğal ve yenilenebilir mühendislik malzemesi içinde (s. 126-152) İstanbul: İÜC Üniversite Yayınevi.

Kurtoğlu, A., 2000, Ağaç Malzeme Üst Yüzey İşlemleri, 1.Cilt: Genel Bilgiler, İ.Ü. Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Üniversite Yayın No: 4262, Fakülte Yayın No: 463, ISBN 975-404-590-9, İstanbul.

Kurt, R., Meric, H., Aslan, K., & Cil, M. (2012). Laminated veneer lumber (LVL) manufacturing using three hybrid poplar clones. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 36(2), 237-245.

Özyürek, Ö., & Aytin, A. (2026). Isıl İşlemin Doğu Ladini ve Dişbudak Odunlarında Kimyasal Bileşenler Üzerine Etkisi. Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 27(3), 1-10.

Schilling JS, Kaffenberger JT, Liew FJ, Song Z (2015) Signature Wood Modifications Reveal Decomposer Community History. PLoS ONE 10(3):e0120679. doi:10.1371/journal. pone.0120679.

Schmidt, O. (2006). Wood and Tree Fungi, Biology, Damage, Protection, and Use. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

TS 4176 (1984), "Taking sample trees and laboratory samples from homogeneous stands to determine the physical and mechanical of wood." Turkish Standarts Institute, Ankara, Turkey.

TS CEN/TS 15679 (2010). "Timber shaped by heat treatment –Terms and characteristics," Turkish Standarts Institute, Ankara, Turkey.

Tjeerdsma, B.F., Militz, H. 2005. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis ofcombined hydrothermal and dry heat-treated wood. Holz Roh-Werkst., 63(2), 102–111.

Yilgör, N., Kartal, S. N. 2010. Heat modification of wood: Chemicalproperties and resistance to mold and decay fungi. Forest Products Journal, 60(4), 357-361.

Zabel, R.A., Morrell, J.J. (1992). Wood Microbiology: Decay and Its Pre- vention. Academic Press, London. ISBN: 0-12-775210-2. 476 s.


BİDGE