...::KENT AKADEMİSİ | URBAN ACADEMY

Volume: 18 Issue: 5 - 2025 | Cilt: 18 Sayı: 5 - 2025

ARTICLE INFO | MAKALE KÜNYESİ

Article Type: Research Article | Araştırma Makalesi
Submission Date | Gönderilme Tarihi: 08.01.2025
Admission Date | Kabul Tarihi: 08.08.2025

CITATION INFO | ATIF KÜNYESİ

Turan Avcı, Ş., Karaman Öztaş, S. (2025). Ahşap Teknolojilerinin Süreç ve Performans Kriterleri Bağlamında Değerlendirilmesi: Sürdürülebilir Tasarım ve Üretim Yaklaşımları, *Kent Akademisi Dergisi*, *18*(5):2813-2830. https://doi.org/10.35674/kent.1615320

Ahşap Teknolojilerinin Süreç ve Performans Kriterleri Bağlamında Değerlendirilmesi: Sürdürülebilir Tasarım ve Üretim Yaklaşımları

Evaluation of Wood Technologies in the Context of Process and Performance Criteria: Sustainable Design and Production Approaches

Şeyma TURAN AVCI[1], Saniye KARAMAN ÖZTAŞ[2]

ÖZ

Dijital tasarım ve üretim teknolojilerinin gelişimiyle birlikte ahşap tasarım ve üretim süreçleri daha kolay kontrol edilebilirken, montaj ve üretim daha hızlı gerçekleştirilebilmektedir. Ahşap teknolojileri ile ilgili çalışmalar her teknolojinin farklı performanslara sahip olduğunu göstermektedir. Bu teknolojilerin analizlerinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için ahşap teknolojilerinin kendi içlerinde sınıflandırılması ve performans kriterlerine göre değerlendirilmesi gerekmektedir. Çalışmada, ahşap teknolojilerinin malzeme, tasarım ve üretim açısından sınıflandırılması, bu teknolojilerin ve süreçlerinin performans kriterlerine göre değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Teknoloji ile üretilen ahşap malzemeler; kütle kereste (Mass timber) olarak CLT (Çapraz Lamine Ahşap), Glulam (Lamine Yapıştırma Ahşap), NLT (Çivili Lamine Ahşap) gibi malzemeler, ahşap kompozitler ve termal modifiye ahşap olarak gruplandırılmıştır. Tasarım açısından, parametrik tasarım, BIM (Yapı Bilgi Modellemesi), CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım), dijital simülasyon, dijital modelleme ve yapay zekâ entegre tasarım uygulamaları ve 3B baskı teknolojileri ele alınmıştır. Üretim açısından, dijital üretim (Prefabrikasyon, modüler sistem, CNC, prototipleme, masif panel sistem, ahşap laminasyon ve presleme sistemleri) ve robotik-otomasyon sistemleri (montaj, işletme robotik demontaj, otonom yapı inşası, yapay zekâ ile makine imalat teknolojisi) olarak incelenmiştir. Bu teknolojiler, işlem hassasiyeti, montaj hızlandırma, sistematik geri bildirim, rasyonalizasyon, yapısal izleme, standardizasyon süreçlerine ve hata azaltma, üretim hızında artış, kolay denetim, dayanım, estetik, enerji etkinliği ve atık azaltma gibi performans kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, çalışmada sistematik literatür analizi yöntemi kullanılarak teknolojilerin ihtiyaçlara uygunluğunun belirlenmesiyle tasarım ve üretim süreçlerinin optimize edilebilmesi hedeflenmiştir. Teknolojilerin mimari tasarım ve üretim süreçlerindeki rolü, çok katmanlı bir analiz yöntemi ile ele alınmıştır. Bu çalışma, ahşap teknolojilerinin performans kriterlerine göre sınıflandırılarak değerlendirilmesi sonucunda, farklı teknolojilerin tasarım ve üretim süreçlerindeki etkinliğini ortaya koymaktadır. Bulgular, bu teknolojilerin kullanım potansiyellerini ve avantajlarını belirleyerek, mimarlık sektöründeki tasarım ve uygulama süreçlerine objektif bir analiz ortamı sunduğunu göstermektedir. Belirlenen kriterler ile ahşap teknolojilerinin tasarım ve üretim süreçlerinde optimize edilmesine yönelik bir çerçeve sunularak, yaklaşımın mimarlık sektöründeki profesyonellere doğru teknoloji seçiminde yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ahşap teknolojileri, Dijital tasarım ve üretim, CNC işleme, CAD, BIM, Sürdürülebilir Yapı Malzemesi, Performans Kriteri

ABSTRACT

With the development of digital design and production technologies, wood design and production processes can be controlled more easily, while assembly and production can be carried out faster. Studies on wood technologies show that each technology has different performances. In order to analyze these technologies correctly, wood technologies need to be classified within themselves and evaluated according to performance criteria. The aim of the study is to classify wood technologies in terms of material, design and production, and to evaluate these technologies and processes according to performance criteria. Wood materials produced with technology are grouped as mass timber (CLT), Glulam (Laminated Timber), NLT (Nailed Laminated Timber), wood composites and thermally modified wood. In terms of design, parametric design, BIM (Building Information Modeling), CAD (Computer Aided Design), digital simulation, digital modeling and artificial intelligence integrated design applications and 3D printing technologies are discussed. In terms of production, digital production (Prefabrication, modular system, CNC, prototyping, solid panel system, wood lamination and pressing systems) and robotic-automation

[1] **Corresponding Author:** Gebze Technical University, seyma.turan2017@gtu.edu.tr, ORCID: 0009-0009-7920-7576
[2] Gebze Technical University, saniyekaraman@gtu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1955-0013

systems (assembly, operation robotic disassembly, autonomous structure construction, machine manufacturing technology with artificial intelligence) are examined. These technologies were evaluated according to process precision, assembly acceleration, systematic feedback, rationalization, structural monitoring, standardization processes and performance criteria such as waste reduction, energy efficiency, easy control, error reduction, aesthetics, durability and increase in production speed. In this context, the aim of the study was to determine the suitability of technologies to the needs by using the systematic literature analysis method and to optimize design and production processes. The role of technologies in architectural design and production processes was addressed with a multi-layered analysis method. This study, as a result of the evaluation of wood technologies by classifying them according to performance criteria, reveals the effectiveness of different technologies in design and production processes. The findings show that these technologies provide an objective analysis environment for design and application processes in the architecture sector by determining their usage potential and advantages. It is thought that the approach will guide professionals in the architecture sector in choosing the right technology by presenting a framework for optimizing wood technologies in design and production processes with the determined criteria.

Keywords: Wood technologies, Digital design and manufacturing, CNC machining, CAD, BIM, Sustainable Building Material, Performance Criteria

GİRİŞ

Ahşap yenilenebilir ve estetik bir yapı malzemesi olarak mimari tasarımlarda rol almaktadır. Günümüzde, çevresel sorunların çözülmesi, insan sağlığı için uygun koşulların sağlanabilmesi gibi sürdürülebilirlik hedeflerine yanıt vermekte; bu da onu sürdürülebilir mimari tasarım için uygun bir seçenek haline getirmektedir. Bu kadar çok yönlü bir malzeme olması ile birlikte geçmişten günümüze her yıl daha da gelişen teknolojiler, ahşapta üretim ve işleme süreçlerini çeşitlendirerek modern mimari için avantajlar sunabilmektedir. Bu teknolojiler, yenilikçi teknikler ile ahşapta daha dayanıklı ve daha estetik sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Yenilikçi teknikler ile desteklenen bu teknolojiler sayesinde, ahşap daha dayanıklı ve estetik nitelikler kazanmış; özellikle CAD ve CAM teknolojilerindeki gelişmeler, tasarım ve üretim süreçlerinde son yüzyılda oldukça belirgin bir rol oynamaya başlamıştır (Kolarevic, 2003).

Son elli yılda, sayısal hesaplama teknikleri ve bilgisayar teknolojilerindeki hızlı ve çok yönlü gelişmeler, mimari tasarım süreçlerinde kapsamlı analizleri ve üretken süreçleri mümkün kılmıştır (İpek, 2014). Bu ilerlemeler, tasarım ve üretim süreçlerinin dijital platformlara taşınmasını sağlamış ve teknolojilerin bu süreçlere dahil edilmesi artık zorunlu bir hal almıştır (İpek, 2014). Sayısal tasarım araçları, mimari proje tasarımında önemli bir rol üstlenmekte ve bu tasarım araçları, geleneksel el çizimlerinin sınırlamalarını aşmak amacıyla sürekli olarak gelişmekte ve evrimleşmektedir (Kaçmaz, 2019). Dijital tasarım araçları, robotik üretim süreçleri ve CNC makineleri gibi ileri teknolojiler, ahşap malzemesinin yeni fırsatlar sunmasını sağlayarak modern mimari için avantajlı bir yapı elemanı haline getirmektedir. Bu yöntemler ile ahşap geleneksel yöntemlerle sınırlanmadan, karmaşık geometrik formlar, detaylı yüzey işlemleri ve yüksek hassasiyetle üretilmiş yapı elemanları elde edilebilmektedir. Kullanılan teknolojilerde gelişmiş ülkelerdeki seviyeye ulaşılması için Türkiye'nin önündeki teknik, yapısal ve kültürel engellerin kalkması gerekmektedir.

Ahşap iskelet yapıların ve bu yapıların içinde kullanılan ahşap malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerine dair kapsamlı bir bilgi birikimi mevcut olmamasıyla birlikte ahşap yapıların avantajları ve dezavantajları ile ilgili derinlemesine akademik çalışmalar da sınırlıdır (Çalışkan vd., 2019). Özellikle bu teknolojilerin yetersiz kullanımı mimarlık sektöründe ahşaba olan eğilimi azaltmakta ve potansiyelinin görülmemesine neden olmaktadır.

Ahşap teknolojiler alanında son on yılda yapılan çalışmalar incelendiğinde, sürdürülebilirlik, dijital tasarım ve üretim yöntemleri ile malzeme inovasyonları gibi konular ön plana çıkmaktadır. Yüksek dayanım, büyük boyut ve birleşim kolaylığı özelliklerine sahip bir yapı malzemesi olan CLT 1990'larda İsviçre'de geliştirilmiştir (Żmijewki vd., 2017). 2017 yılından itibaren, CLT gibi kütle kereste malzemelerin yaygınlaşması ile dayanıklılığa yönelik araştırmalar hız kazanmıştır (Harte,2017; Wieruszewski vd., 2017). Bunun yanı sıra, CLT'nin biyolojik bozulmaya karşı direncini arttırmak için de çalışmalar yürütülmüştür (Bagheri vd.,2022). 2021 yılında, ısı ile modifiye edilmiş ahşabın renk değişiminin, bir kalite göstergesi olarak ele alınabileceği ifade edilmiştir (Torniainen vd., 2021). Çırpı vd., (2021) ise çalışmasında 2000'li yıllardan itibaren mimarlık alanında bilgisayar destekli tasarım ve üretim konularına yönelik araştırmaların giderek artış gösterdiğini belirtmiştir. Aynı yıl yapılan bir başka çalışmada Kunic vd., (2021); yarı otonom

ahşap inşa etme sürecine yönelik geliştirilen siber-fiziksel sistemin, montaj, demontaj ve yeniden montaj aşamalarında test edilen deneysel prototiplerle işleyişini ortaya koymuştur. Ayrıca, ahşap bazlı katkı maddeli üretim teknikleri üzerine yapılan araştırmalarda Das vd., (2021), özellikle 3B baskı süreçlerinde ahşap tozlarının kullanımına odaklanmıştır. Coşkun vd., (2022), çalışmalarında Cambridge Merkez Camisi'nde Glulam ve CLT kullanımı incelenerek, camide kullanılan teknolojik ahşap yapı sistemi üzerinden değerlendirilmiştir. 2023 itibariyle, katkılı üretim sürecinin ahşap mimari ve inşaat için yapı sektörüne entegrasyonu üzerine araştırmalar sürmektedir (Fréchard vd., 2023). Bunun yanı sıra Premrov vd., (2023), çağdaş ahşap yapı sistemlerini tanımlamak ve sınıflandırmak amacıyla bilimsel ve mesleki literatür taramasına dayalı kapsamlı bir inceleme sunmaktadır.

Bekiroğlu vd., (2024) çalışmalarında, Sivrihisar Ulu Cami'nin tarihi ahşap bileşenlerin dijital belgeleme yöntemleri ile analiz edilmesi, fotogrametri yöntemiyle modellenmesi ve CNC üretim sürecinin simüle edilerek analiz edilmesi ele alınmıştır. Ahşap teknolojileri üzerine yapılan araştırmaların büyük bir kısmı uluslararası literatürde yer almaktadır. Özellikle Avrupa ve Kuzey Amerika'da önemli adımlar kaydedilmiştir. Türkiye'de ise bu alandaki uygulamalar ve akademik çalışmalar sınırlı düzeydedir.

Bu çalışmada, ahşap yapı teknolojilerinin belirlenen kriterlere göre sınıflandırılması, teknolojilerin analiz edilmesi ve literatür yöntemiyle değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Literatür incelemesiyle şekillenen süreçler ve süreçlere yönelik performans kriterleri ahşap teknolojileri kapsamında değerlendirilerek belirlenmiştir. Ele alınan kriterler; hata azaltma, üretim hızında artış, kolay denetim, dayanım, estetik, enerji etkinliği ve atık azaltmadır. Bu bağlamda, yapılan sınıflandırma ahşap teknolojilerinin avantajlarını karşılaştırarak dikkat edilmesi gereken noktaları ortaya koymakta ve mimarlıkta daha etkili bir kullanım alanı sağlayabileceği öngörülmektedir.

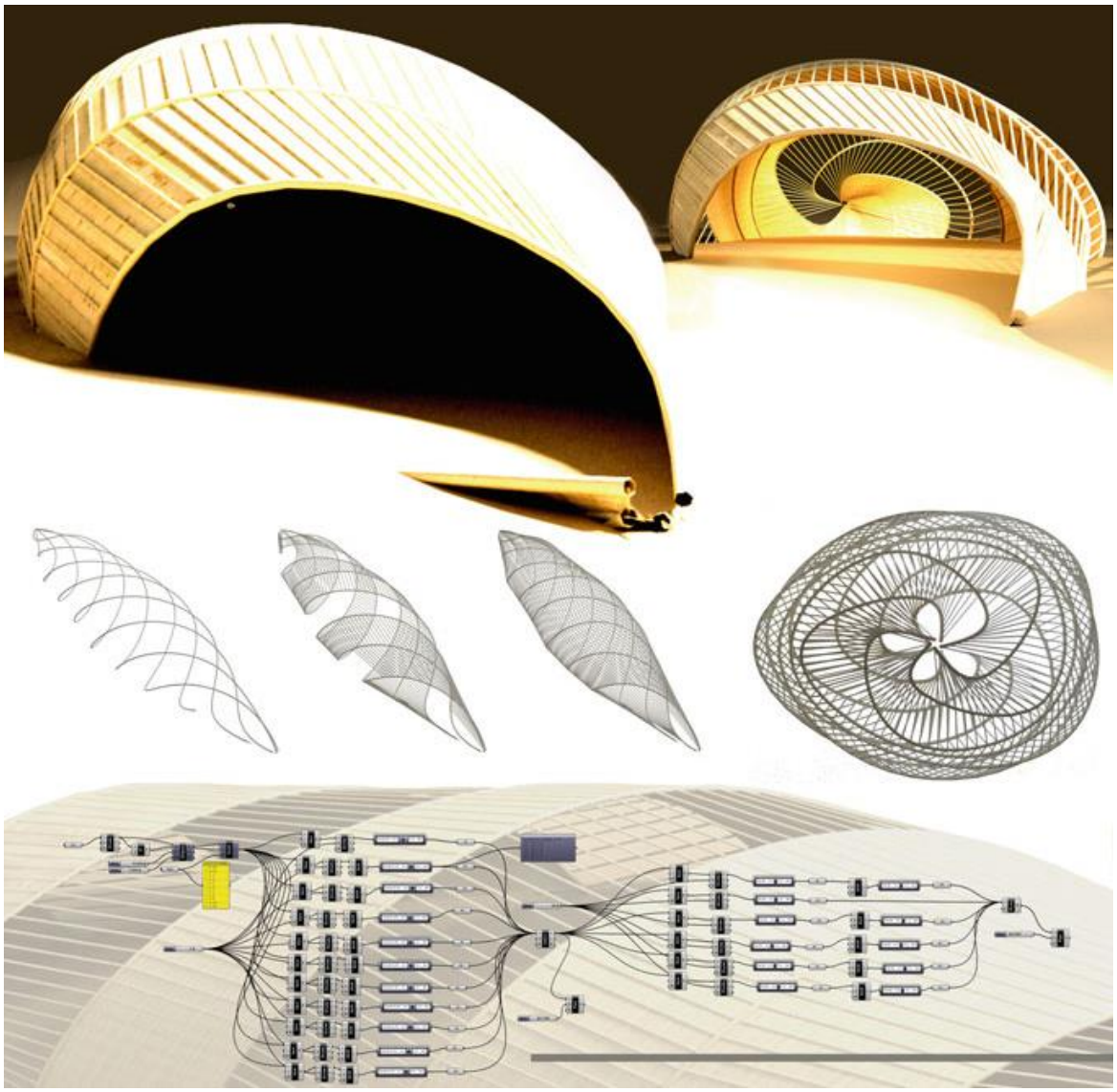
1. Ahşap Teknolojilerinin Gelişimi

Ahşap teknolojilerindeki gelişim yapım tekniklerini gelişmiş geleneksel yapım tekniklerinin ötesine taşıyarak çok katlı yapılar ve geniş açıklıklı strüktürler gibi farklı mimari projelerin gerçekleştirilmesini mümkün kılmıştır. Yapım tekniklerindeki ilerlemelerle birlikte, modern ahşap malzemeler arasında yer alan kütle kereste türleri; özellikle CLT, Glulam ve LVL gibi yenilikçi ürünler, mimarlık sektöründe önemli bir yer edinmiştir (Mayo, 2015). Kütle kereste, geniş kesit boyutlarıyla inşaat sektöründe çelik ve beton gibi geleneksel yapı malzemelerine güçlü bir alternatif olarak ortaya çıkan, mühendislik özellikleri geliştirilmiş bir ahşap malzemedir (Harte, 2017).

Çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik avantajlar ve teknik özellikler bakımından bu malzemeler ve yapı sistemleri, inşaat sektöründe giderek artan bir ilgi görmektedir (Harte, 2017). Bu malzemeler, mimari tasarımlarda ve inşaat süreçlerinde farklı potansiyeller sağlamasının yanı sıra dayanım ve estetik açıdan da projelere çeşitli olanaklar sunmaktadır.

1.1 Tasarım Teknolojileri

Dijital tasarım yöntemleri üretim yöntemlerinin öncüsü olarak tasarım aşamalarının daha hızlı ve daha detaylı olabilmesini sağlamaktadır. Parametrik tasarım, BIM, CAD, dijital simülasyon, dijital modelleme, yapay zekâ destekli tasarım, 3B baskı gibi teknolojiler tasarım süreçlerinde sıkça kullanılmaktadır (Şekil 1). 1980'lerde Kessel ve Julius Natterer, ağır kereste inşaatında yazılım geliştirmelerini başlatarak CAD/CAM teknolojisinin ahşap inşaatta uygulanmasını teşvik etmiştir. Son yıllarda ahşap, ileri teknoloji tasarım araçları ve büyük ölçekli yapılar için daha yaygın bir malzeme olarak tercih edilmeye başlanmıştır (Tannert vd., 2008).



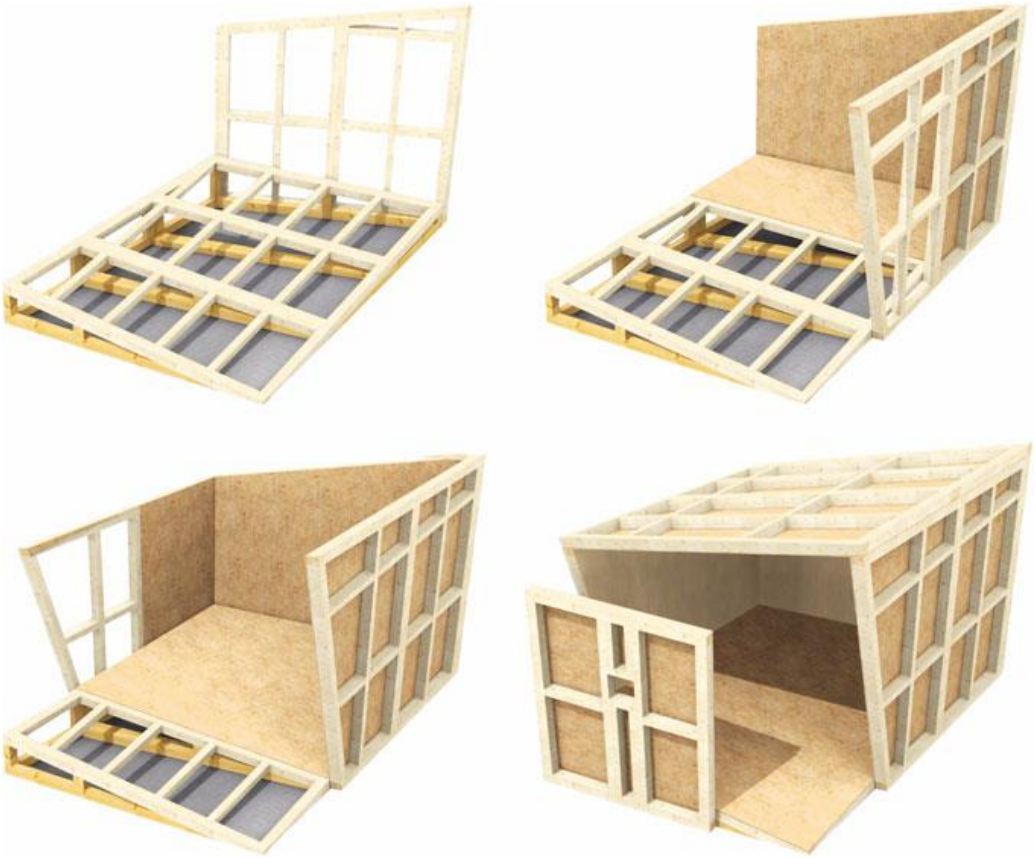
Şekil 1. Dijital tasarım: Toyo Ito'nun salyangoz kabuğundan esinlenerek tasarladığı ahşap yapının öğretici üretken modelleme süreci (Bianconi vd., 2019).

Parametrik tasarım, esnek tasarım ve kontrol kolaylığı açısından ahşap mimarisinde tercih edilen bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. 2000'li yılların başında dijital tasarım süreçlerinde kullanılarak daha serbest ve esnek formların kolaylıkla tasarlanabilmesine olanak tanımıştır. Ahşap malzemenin de doğal sınırları dahilinde daha özgür formlarda kullanılabilmesi sağlanmıştır. Karmaşık geometriler ahşap teknolojilerindeki yeni teknikler ile tasarlanıp üretilebilmektedir (Fréchard vd., 2023).

BIM, 2000'li yılların ortalarından itibaren kullanımı sıklığı artarak göz önünde bulunup önemli bir yere sahip olmuştur. Malzeme performansı, sürdürülebilirlik verileri ve yapısal özelliklerinin detaylı analiz edebilmesi gibi analitik yetenekleri ile, inşaat süreçleri daha verimli ve uyumlu yönetilmektedir. Bu bağlamda, projede BIM teknolojisi aracılığıyla yapının durumu daha hassas bir şekilde analiz edilebilmekte, performans değişimleri tahmin edilebilmekte ve böylelikle ahşap yapıların dayanıklılığı artırılabilmektedir (Şekil 2) (Llatas vd., 2022).

BIM, yapının sanal ortamda doğru ve detaylı bir şekilde modellenmesini mümkün kılarak inşaat, imalat ve tedarik süreçlerini bütüncül biçimde desteklemektedir (Eastman vd., 2011). BIM'in kullanımıyla, yapıların karbon ayak izinin azaltılması ve enerji verimliliğinin sağlanması amaçlanmaktadır. Ahşap inşaat projelerinde BIM metodolojileri ve araçlarının kullanılmasıyla, malzeme miktarının ve diğer bileşen

tahminlerinin doğruluğu nedeniyle malzemeler optimize edilebilmektedir. Atık miktarının minimum seviyeye indirilmesiyle çevre üzerindeki etkiler azaltılmakta ve inşaat maliyetlerinde tasarruf sağlanmaktadır (Llatas vd., 2022).



Şekil 2. Yapı bilgi modeli (BIM): bileşenlerin dijital üretimi ve inşaat süreçlerinin simülasyonu (Bianconi vd., 2019).

CAD yazılımları, tasarımcının verimliliğini artırarak daha kısa sürede daha fazla tasarım üretmesine olanak tanırken, aynı zamanda tasarım süreçlerinde kaliteyi yükselterek hata oranlarını minimum seviyeye indirir; bunun yanı sıra, hızlı ve pratik çözümler sunarak tasarımların detaylandırılması, mühendislik analizlerinin kapsamlı bir şekilde yapılması ve standartlara uygun, yüksek kaliteli sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır (Arslan vd., 2017). Ahşap mimarisinin yanında diğer yapı malzemelerinin kullanıldığı sistemlerde de CAD teknolojisi kullanılmaktadır. Bu teknoloji ile iki veya üç boyutlu olarak tasarlanan projeler, dijital modelleme ile görselleştirilebilmektedir. Dijital simülasyon kullanılarak yapılan tasarımın farklı koşullar altında sergileyeceği davranışlar analiz edilmektedir.

Yapay zekâ, hesaplamalı tasarımın analiziyle proje süreçlerini dönüştürerek mimarlıkta artan gereksinimlere yanıt vermiş; bu süreçte simülasyonlara ve deneysel modelleme tekniklerine dayalı yenilikçi çözümler ortaya koymuştur (Bianconi vd., 2019). Ahşap yapılardaki tasarım sürecinde yapay zekâ kullanılarak parametrik tasarım ile entegre algoritmalarla tasarım kriterleri oluşturulabilmekte ve daha yüksek performans beklentilerine cevap verilebilmektedir.

İnşaat sektöründe, doğrudan sahada üretilen ya da önceden monte edilip sahada birleştirilen modüler sistemler giderek daha fazla tercih edilmektedir (Labonnote vd, 2016). 3B baskı, uzun süredir prototipleme süreçlerinde kullanılmış olsa da günümüzde, kullanılan teknoloji, malzeme veya hedeflenen uygulamadan bağımsız olarak tüm eklemeli üretim yöntemlerini kapsayan genel bir kavram olarak kabul edilmektedir

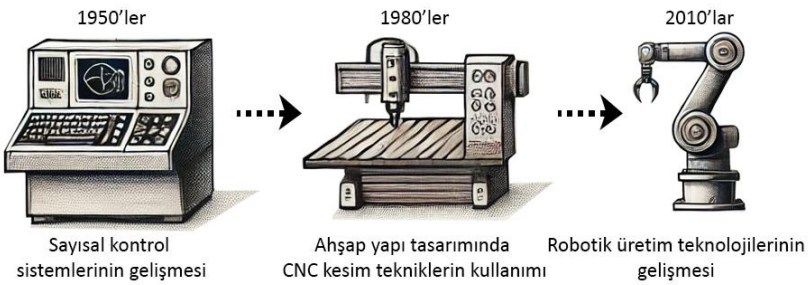
(Strauss, 2013). 3B baskı teknolojisinin katkısı ile de sürdürülebilir, özelleştirilebilir, maaliyeti düşük ve verimli üretim süreçleri olan bir mimari üretmek hedeflenmektedir (Bierach vd., 2023).

1.2 Üretim Teknolojileri

Yapı sektöründe üretim teknolojilerinin kullanımı, 20. yüzyılın sonlarına doğru hızla yaygınlaşarak üretim süreçlerinde modernizasyonun önünü açmıştır. Özellikle 1950'lerde ABD'de gelişen sayısal kontrol sistemleri, üretim süreçlerini daha hassas ve verimli hale getirerek, yapı malzemeleri ve sistemlerinde teknolojik ilerlemeleri tetikleyen bir dönüm noktası olmuştur (Tannert vd., 2008). İlk olarak CNC işleme makineleri metal endüstrisinde kullanılmaya başlanmış ve daha sonra ahşap ve diğer malzemeler için geliştirilerek kullanılmıştır. Ahşap yapı tasarımında CNC kesim teknikleri, 1980'lerin başlarında popüler hale gelmiş ve ahşabın karmaşık formlarda işlenmesini mümkün kılarak, geleneksel işleme yöntemlerine kıyasla daha yüksek hassasiyet ve hız sağlamıştır. Geleneksel kereste doğramasının uygulanabilirliği, marangoz becerileri ve mevcut araçlar gibi pratik hususlar tarafından yönetilmiştir. Gelişmiş CNC ahşap işleme makineleri, geleneksel üretim süreçlerinin sınırlarını genişleterek, karmaşık geometrilerin uygulanabilirliğini mümkün ve ekonomik hale getirmiştir (Tannert vd., 2008). Ahşabın kolay şekillendirilebilme özelliği, dijital kontrol teknolojilerine sahip işleme sistemleri için onu ideal bir malzeme haline getirmiştir ve bu sayede tasarım özgürlüğü önemli ölçüde artmıştır (Buri vd., 2011). Dijital tasarım teknolojileri ile de farklı tasarım çözümleri geliştirilerek üretim otomatikleşmektedir (Duarte, 2005).

Robotik sistemler, CAD/CAM teknolojilerinin CNC endüstrisine entegrasyonu sayesinde mimarlık alanında önemli bir yer kazanmış, tasarım ve üretim süreçlerinde daha fazla doğruluk ve esneklik sağlamıştır (Buswell, 2007). Ahşap malzemenin CNC işlenebilirliği ile de serbest formlu yapılar üretilebilmektedir (Pottmann vd., 2015).

Robotik üretim teknolojileri, 2010'lu yıllarda gelişerek kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknoloji ile panel, çerçeve, hibrit gibi sistemlerde ahşap yapı bileşenleri üretimi, otomatik üretim süreçlerinde önemli rol oynamaktadır (Şekil 3). 2025 yılı itibari ile inşaat sürecinde kullanılan robotların adedinin yedi bini aşması öngörülmektedir (Lobos Calquin vd.,2024). Gramazio ve Kohler tarafından ele alınan çalışmalar, robotik kol sistemleri ile ahşap bileşenlerin hızlı ve hassas bir şekilde birleştirilebildiğini göstermektedir (Şekil 4). Robotlar, sınırsız fiziksel işlem gerçekleştirme olanaklarının yanı sıra, geleneksel inşaat yöntemlerinden farklı olarak algoritmik kodlama ve programlama sayesinde hassas ve dinamik tasarımlar oluşturulmasını sağlamaktadır (Gramazio vd., 2014).



Şekil 3. Ahşap üretim teknolojilerinin kronolojik süreci(Şekildeki görseller OpenAI'nin DALL·E aracıyla üretilmiştir.)

Şekil 4. Robotik üretim atölyesinde ahşap bileşenlerin robotik kol sistemleriyle eklemeli montajı (Gramazio vd., 2014).

Ahşap ile tasarım ve üretimde kullanılan teknolojilerin tarihsel gelişimi, robotik üretim, dijital modelleme, simülasyon gibi yöntemler ile önemli bir evrim geçirmiştir. Bu teknolojiler tasarım süreçlerinde esneklik sağlarken, aynı zamanda kullanılan teknolojilerin etkinliğini ve işlevselliğini değerlendirmek için belirli performans kriterlerini de gündeme getirmiştir.

2. Yöntem

Ahşap teknolojileri ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, bu çalışmaların genellikle geleneksel ahşap yapım sistemlerine odaklandığı görülmektedir. Ancak bu çalışmada, ahşap malzeme teknoloji bağlamında ele alınmış ve ahşap teknolojilerinin performansını değerlendirmeye yönelik literatürden referans alınarak süreçler ve kriterler belirlenmiş, ardından bir sınıflandırma sistemi oluşturulmuştur (Tablo 1). Bu sınıflandırmada, ahşap teknolojilerinin avantajları ve özellikleri dikkate alınarak kriterler belirlenmiştir. Ahşap teknolojileri üç ana grupta incelenmiştir: teknoloji ile üretilen ahşap malzemeler, tasarım açısından ahşap teknolojileri ve üretim açısından ahşap teknolojileri.

- Teknoloji ile üretilen ahşap malzemeler; kütle kereste, ahşap kompozitler ve termal modifiye ahşap,
- Tasarım açısından ahşap teknolojileri; parametrik tasarım, BIM, CAD, dijital simülasyon, dijital modelleme, yapay zekâ entegre tasarım uygulamaları ve 3B baskı teknolojileri,
- Üretim açısından ahşap teknolojileri; dijital üretim, CNC teknolojisi açısından ahşap teknolojileri ve robotik-otomasyon açısından ahşap teknolojileri olarak sınıflandırılmıştır.

Ahşap teknolojilerinin mimari tasarım ve üretim süreçlerine entegrasyonu, çok katmanlı bir analiz yöntemiyle detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu analiz yöntemi, ahşap teknolojilerinin yapı ve üretim süreçlerine etkisini daha iyi anlamak ve bu teknolojilerin süreçlerle olan ilişkilerini ortaya koymak amacıyla üç temel katmandan oluşmaktadır.

İlk katman, malzeme, tasarım ve üretim süreçlerinde kullanılan ahşap teknolojilerinin bileşenlerini ele almaktadır. Bu bağlamda, teknoloji kullanılarak üretilen ahşap malzemeler olarak, örneğin glulam, CLT, yapısal yonga levhalar (OSB), termal modifiye ahşap ve diğer yüksek performanslı ahşap ürünleri incelenmiştir. Ayrıca, ahşap tasarım teknolojileri ve üretim süreçlerinde dijital üretim, hassas CNC işleme ve robotik otomasyon açısından teknolojiler gibi yenilikçi yöntemler iki başlık altında değerlendirilmiştir.

İkinci katman, bu teknolojilerin işlevselliğinden beklenen süreçleri ifade etmektedir. Özellikle işlem hassasiyeti süreci ile üretim ve tasarım aşamalarında yüksek seviyede hassasiyet sağlanarak hata oranını en aza indirmek amaçlanmaktadır.

Üçüncü katman, ahşap teknolojilerinin süreçler üzerindeki etkilerini ve performans kriterleri açısından çıktılarını değerlendirmektedir. Belirlenen kriterler, ahşap teknolojilerinin sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından potansiyelini incelemek için belirleyici parametrelerdir. Bu çok katmanlı analiz yöntemi, ahşap teknolojilerinin yalnızca bireysel dinamiklerini değil, aynı zamanda bu süreçlerin performans kriterleriyle olan ilişkilerini de ortaya koymaktadır.

Ahşap teknolojilerine ilişkin süreçler, değerlendirilen teknik yönlerinin yanında, üretim verimliliği, sürdürülebilirlik ve tasarım optimizasyonu gibi çok boyutlu faktörler çerçevesinde ele alınmaktadır. Bu değerlendirme yöntemi sayesinde, mevcut akademik çalışmalar ve uygulamalarda eksik kalan noktalar belirlenerek daha bütüncül bir yaklaşım ile değerlendirilmesi sağlanacaktır. Bunun yanında belirlenen süreçler ve kriterler doğrultusunda ahşap tasarım ve üretim teknolojilerinin sınıflandırılması, literatürde dağınık halde bulunan bilgilerin bir araya getirilerek karşılaştırılabilir bir sistem oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada, literatürde konu ile ilgili öne çıkan akademik çalışmalar incelenmiş ve ahşap teknolojilerine yönelik bir sınıflandırma yapılmıştır. Bu bağlamda, konu ile ilgi olmayan veriler kapsam dışında bırakılarak karşılaştırılabilir bir analiz metodu geliştirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, belirlenen her bir ahşap teknolojisinin dahil olduğu süreçler ve öne çıkan performans kriterleri belirlenmiş ve sınıflandırılmıştır. Böylece, teknolojiden beklenen kriterler doğrultusunda karşılaştırılabilir bir değerlendirilme yapılabilmektedir. Örneğin, üretim hızının önemli olduğu durumlarda, bu performans kriterini sağlayan teknolojiler öncelik olarak değerlendirilebilir.

Sınıflandırma tablosunda, her bir ahşap teknolojisinin dahil olduğu süreçler ve beklenen performans kriterleri literatür değerlendirmeleri doğrultusunda sistematik olarak işaretlenmiştir. Tabloda çarpı işareti bulunan hücreler, ilgili teknolojinin dahil olduğu süreç veya performans kriteriyle ilişkili olduğunu ifade etmektedir. Boş hücreler ise belirtilen teknolojinin değerlendirilen akademik araştırmalarda süreçler ve beklenen performans kriterleri ile bağlantı kurulmadığını belirtmektedir. Bu sınıflandırma yöntemi, ahşap teknolojilerinin öne çıkan ve çıkmayan yönlerini belirleyerek daha bilinçli seçimler yapılmasını sağlayabilecek karşılaştırılabilir bir değerlendirme ortamı sunmaktadır.

Tablo 1. Ahşap Teknolojilerinin Süreç ve Performans Kriterlerine Göre Sınıflandırması.

		Ahşap Teknolojileri																			
		Teknoloji ile Üretilen Ahşap Malzemeler			Tasarım Açısından Ahşap Teknolojileri							Üretim Açısından Ahşap Teknolojileri									
												Dijital Üretim ve CNC Teknolojisi Açısından Ahşap Teknolojileri						Robotik ve Otomasyon Açısından Ahşap Teknolojileri				
		Kütle Ahşap	Ahşap Kompozitler	Termal Modifiye Ahşap	Parametrik Tasarım	BIM	CAD	Dijital Simülasyon	Dijital Modelleme	Yapay Zeka Entegre Tasarım	3D Baskı	Prefabrikasyon	Modüler Sistem	CNC	Prototipleme	Masif Panel Sistem	Ahşap Laminasyon ve Presleme	Montaj	İşletme	Robotik Demontaj	Otonom Yapı İnşası	YZ ile Makine İmalat Teknolojisi
Süreçler	İşlem Hassasiyeti	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Montaj Hızlandırma	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Sistematik Geri Bildirim					X	X	X	X											X	X	
	Rasyonalizasyon	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X	X	X	
	Yapısal İzleme					X		X		X												
	Standardizasyon	X				X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X		X	X	X
Performans Kriterleri	Hata Azaltma	X			X	X	X	X	X	X			X	X	X			X		X	X	
	Üretim Hızında Artış	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Kolay Denetim	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X								X	
	Dayanım	X	X	X				X				X	X	X		X	X		X			
	Estetik	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X		X						
	Enerji Etkinliği	X	X	X	X	X				X	X	X	X			X	X					
	Atık Azaltma	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X
		(Bagheri vd., 2022; Harte, 2017; Aicher vd.,2013; Zmijewki vd., 2017; Wieruszewski vd., 2017; Premrov vd., 2023; Mayo, 2015; Kitek Kuzman vd.,2017)	(Aicher vd., 2013; Harte, 2017; Premrov vd., 2023; Wójcik, 2020; Kitek Kuzman vd.,2017)	(Tjeerdsma vd., 1998; Zelinka vd., 2019; Torniainen vd.,2021)	(Bianconi vd., 2019; Çırpı vd., 2021; Wójcik, 2020; Buri vd., 2011)	(Nawari, 2012; Harte, 2017; Lobos Calquin vd., 2024)	(Bianconi vd., 2019; Çırpı vd., 2021; Buri vd., 2011; Calquin vd., 2024)	(Bianconi vd., 2019; Wójcik, 2020)	(Bianconi vd., 2019; Çırpı vd., 2021)	(Bianconi vd., 2019)	(Bierach vd., 2023; Çırpı vd., 2021; Das vd., 2021)	(Bianconi vd., 2019; Çırpı vd., 2021, Leskovar vd., 2013; Kitek Kuzman vd., 2017; Harte, 2017)	(Bianconi vd., 2019; Kitek Kuzman vd., 2017; Leskovar vd., 2013)	(Bianconi vd., 2019; Çırpı vd., 2021; Fréchard vd., 2023)	(Çırpı vd., 2021; Fréchard vd., 2023)	(Wieruszewski vd., 2017; Harte, 2017; Premrov vd., 2023; Leskovar vd., 2013)	(Aicher vd., 2013; Harte, 2017; Leskovar vd., 2013)	(Aicher vd., 2013; Fréchard vd., 2023; Kunic,vd., 2021; Çırpı vd., 2021)	(Fréchard vd., 2023; Premrov vd., 2023)	(Kunic,vd., 2021)	(Kunic,vd., 2021)	(Buri vd.,2011; Harte, 2017)

3. Bulgular

Bu çalışmada ahşap teknolojileri, malzeme teknolojileri, tasarım teknolojileri ve üretim teknolojileri olarak üç grupta sınıflandırılmıştır. Her bir teknoloji grubu, farklı süreçlere dahil olmakta ve bu süreçler belirli performans kriterleriyle ilişkilendirilmektedir. Çalışma kapsamında ayrıca bu üçlü yapı (teknoloji- süreç-performans) üzerinden bir etkileşim çerçevesi geliştirilmiştir.

Ahşap yapıların tasarım sürecinde öne çıkan teknolojiler; BIM, CAD, parametrik tasarım, dijital simülasyon, yapay zekâ destekli modelleme ve 3B yazıcılardır. Bu yapıların dijital üretim süreçlerinde 3B CAD/CAM teknolojileri ile BIM entegrasyonu; tasarım, analiz ve görselleştirme aşamalarında gereklilik haline gelmiştir (Calquin vd., 2024). Bu teknolojiler, işlem hassasiyeti, hata azaltma, kolay denetim ve standardizasyon gibi performans kriterlerine katkı sunmaktadır. Ahşap teknolojilerine yönelik süreçlerde işlem hassasiyeti önemli bir adımdır. Bu süreç, dijital tasarım ve üretim teknolojilerinden beklenen hata azaltma performansı ile ilişkilidir. Bir tasarımı üç boyutlu ortamda görselleştirmek, inşa sürecinden önce ortaya çıkabilecek sorunların önüne geçilmesini ve bunların farklı yönlerinin analiz edilebilmesini sağlar (Bianconi vd., 2019). Özellikle BIM, proje aşamasında gerçek zamanlı geri bildirimler sağlayarak tasarım sürecinde oluşabilecek hataların erken tespitini mümkün kılmaktadır. BIM, yapısal izleme süreçlerini kolaylaştırarak geri bildirim mekanizmalarının etkin çalışmasını sağlarken, aynı zamanda denetim süreçlerinde bilgiye hızlı erişim ve detaylı analiz imkanı sunarak hata risklerini minimize etmektedir (Bianconi vd., 2019).

Kolay denetim kriteri tasarımın yapımından üretim aşamasına kadar takibinin yapılabilmesini ve doğal bir malzeme olan ahşaptan meydana gelebilecek deformasyonları veya sorunları öngörerek kontrol altına alınabilmesini sağlamaktadır. BIM, CAD tabanlı AGACAD, Archiframe ve Timber Framing gibi sistemler ile tasarım denetimi, proje henüz üretim aşamasına geçmeden önce kontrol edilebilmekte, bu sayede belirlenen kalite standartlarının takibi kolaylıkla sağlanabilmektedir. Bu kriterin vurgulanması, ahşap tasarımlarında dayanıklılık ve güvenliğin oldukça önemli bir noktada olduğunu göstermektedir. Prefabrik CLT yapı sistemleri, düşük seviyede atık oluşumu, kolay kurulum ve hızlı montaj imkanı sunmaktadır (Harte, 2017). Ahşap malzeme, geleneksel el imalatları ile gerçekleştirilen üretimlerde ortaya çıkabilecek hatalar nedeniyle maaliyet artışları ve güvenlik riskleri oluşturabilmektedir. Bunun yanında tasarım sürecinde teknoloji aracılığı ile bu ihtimal azalmaktadır. Ahşabın geleneksel üretim ve montaj aşamalarında malzemenin doğallığından ortaya çıkabilecek zorluklar teknoloji sayesinde çözüm bulabilmektedir. Bu sayede yüksek hassasiyet ve yüksek hızda üretilip montajlanabilir. İşlem hassasiyeti gibi süreçlerinin bir getirisi olarak da hızlı üretim ortaya çıkmaktadır (Bianconi vd., 2019). Standardizasyonun, bir tasarım teknolojisi olarak BIM'de benimsendiği görülmektedir. Böylece girdiler daha doğru bir şekilde yönetilerek, tasarım aşamasından üretim aşamasına geçiş daha kontrollü ve güvenli olmaktadır. BIM'in ahşap yapılarda verimli kullanılabilmesi için uluslararası bir standardizasyon süreci benimsenerek farklı yazılım araçlarında uyumlu bir şekilde çalışması ile verimlilik artışına katkı sağlaması önemli olmaktadır (Nawari, 2012).

Ahşap üretim teknolojileri CNC, robotik sistemler, prefabrikasyon, modüler sistemler, panel sistemleri, laminasyon ve presleme sistemlerinden oluşmaktadır. Bu teknolojiler üretim hızı, montaj hızlandırma, rasyonalizasyon, standardizasyon ve sistematik geri bildirim mekanizmalarının etkinliği açısından öne çıkmaktadır. Bu bağlamda en çok odaklanılan performans kriteri montaj hızlandırma sürecini takip eden üretim hızlandırmadır. Özellikle CLT gibi fabrikada önceden üretilen malzemeler ile montaj süresi kısalmakta, aynı zamanda doğal bir malzeme kullanılarak da maliyet azalmaktadır. CLT, büyük boyutlu levhalar halinde üretilerek prefabrikasyona uygun hale gelebilmekte bu sayede inşa süreci hızlanmaktadır (Kitek Kuzman vd., 2017). Üretim sürecinde bu levhalar ise CNC kesim makineleri ile projeye uygun ve doğru şekilde karmaşık geometrilerin kesimleri yapılmakta ve ahşaplar sahada hızlıca birleştirilmektedir. CNC, karmaşık geometrilerin oluşturulmasında etkili bir araç olmasının yanı sıra, bu süreçte kaynak verimliliğinin arttırılması üzerinde de durulmalıdır (Fréchard vd., 2023).

Dijital tasarımın robotik ve CNC makineler ile entegre çalışması, tasarımın doğrudan üretilebilmesine olanak tanımaktadır. Kesim, montaj gibi işlemleri ile daha hızlı ve sorunsuz sonuçlar olmasının yanında daha uzun ömürlü ve dayanıklı sonuçlar elde edilmektedir. Dijital tasarım yöntemi ile yapılan 3B modellerin CNC teknolojisi ile simülasyonu sağlanarak, işlenmesi zor olan ahşap kolay ve hızlı bir şekilde sonuca ulaşmaktadır (Çakıroğlu vd., 2023).

Dijital tasarım ve üretim yöntemleri, geleneksel yapım yöntemlerine kıyasla üretimi hızlandırarak karmaşık formların kolaylıkla üretilebilir olmasını sağlamaktadır (Çırpı vd., 2021). Ahşap, doğal lif yapısı sayesinde son derece elastik bir malzemedir ve bükülmesi kolaydır. Bu özellik inşaatta ve form oluşturmada kullanılabilir. Kereste kaburga kabukları, tasarımında ahşabın esnek yapısından ilham almaktadır (Buri vd.,2011). Ahşap yapı üretim çeşitlerinden olan panel sistem ise hazır elemanların temel üzerine yerleştirerek vidalanması ile hızlı bir montaj süreci sağlanabilmektedir (Leskovar vd., 2013). Panel sistem ile doğal malzeme kullanımı, tedarik kolaylığı olan bir sistem olarak enerji etkinliği de sağlanmaktadır (Leskovar vd., 2013).

Ahşap teknolojilerinde değerlendirilen bir diğer performans süreci olarak sistematik geri bildirim ile yapılacak hatalar henüz yapılmadan önüne geçilebilmektedir. Parametrik tasarım, dijital üretim teknikleri analiz araçları olarak kullanılmaktadır (Wójcik, 2020). Böylece çalışmalarda hızlı geri bildirimler alınabilmektedir. Ahşap doğal yapısı gereği nem oranı ve yoğunluk gibi özellikleri sebebiyle çevresel faktörlere duyarlı bir malzemedir. Bu nedenle, teknoloji yardımı ile üretilen ahşap malzemenin oluşum sürecinden tasarım aşamasına kadar olan süreçte, ahşap yakında izlenmeli ve ahşabın işlenmesi sırasında deformasyon ve yüzey hatalarının önüne geçmek için geri bildirim mekanizmaları takip edilmelidir. Sistematik geri bildirim sayesinde malzemeden uygun performans sağlanmaktadır. Sistematik geri bildirimde sağlanan sürekli veri akışı ve şeffaflık sayesinde, denetim süreçleri daha etkin ve erişilebilir hale gelerek kolay bir denetim performansına ulaşılmaktadır.

Bu teknolojilerde diğer önemli süreçlerden olan rasyonalizasyon ve standardizasyon ile de hatalar azaltılarak daha kontrollü ve kolay bir denetim performansı sağlanabilmektedir. Standartlaşmada prefabrik ahşap ev endüstrisinde üretim verimliliği artmaktadır (Şişman, 2018). Rasyonalizasyon süreci, kullanılan teknolojiler, iş gücü ve zaman tasarrufunun yanında malzeme kullanımının optimize edilmesini sağlamaktadır. Parametrik tasarım, 3B modelleme gibi dijital tasarım araçları ile analizler yapılarak da karmaşık yapılar hızlı bir şekilde modellenip bilgisayar kontrollü üretim makinelerine doğrudan aktarılarak süreçler rasyonalize edilebilmektedir (Buri vd., 2011). Ahşabın tasarım ve üretim teknolojilerindeki verimli kaynak kullanımı daha ekonomik ve çevresel geri dönüşler sunmaktadır.

Standardizasyon, hata azaltma, kolay denetim, üretimi hızlandırma kriterlerinin birlikte belirlendiği bir sistemdir. Ahşabın tasarım ve üretim süreçlerinde, malzeme kullanımı, işleme ve montaj aşamalarının belirlenen kurallara ve normlara göre planlanması ile standardizasyon sistemi oluşturulmaktadır. Önceden belirlenmiş süreçler ile yapı elemanlarının ölçüleri, bağlantıları, dolu boş alanları oluşturulup kalite kontrol kolaylığı sağlanmakta, böylece daha verimli ve hızlı bir üretim gerçekleştirilmektedir. Standardizasyon süreci ile özellikle üretim teknolojilerinde daha fazla karşılaşılmaktadır (Nawari, 2012).

Malzeme teknolojileri kapsamında, CLT, Glulam, NLT, termal modifiye ahşap ve kompozit ahşaplar ele alınmaktadır. Bu malzemeler özellikle dayanıklılık, atık azaltma, enerji etkinliği ve estetik kriterlerinde yüksek performans göstermektedir. Teknoloji ile üretilen malzemelerin ise belirli standartlara uygun şekilde üretimi yapılarak geniş bir pazar ağına erişimi mümkün olmaktadır. Kütle ahşap ve glulam gibi ürünler, doğal ahşabın estetik etkisini kompozit ahşaba kıyasla korumaktadır (Hoadley vd., 2000). Özellikle bir kütle ahşap çeşidi olan CLT, yüksek dayanımlı bir malzeme olarak popülerliğini sürdürmektedir (Bagheri vd., 2022). Dayanımı yüksek olan CLT çok katlı yapılarda tercih edilen bir seçenek olarak inşaat pazarında rol almaktadır (Wieruszewski vd., 2017). Ayrıca, inşaatta yüksek dayanıklığa sahip meşe, karaağaç ve gürgen gibi ağaçlardan üretilen ahşaplar, dayanım ve uzun ömür özellikleriyle öne çıkmaktadır (Leskovar

vd., 2013). Ahşap, ısıl işlemle modifiye edilerek ise özellikle higroskopiklik, boyutsal kararlılık ve biyolojik dayanıklılıkta belirgin iyileşmeler gözlemlenirken; mekanik dayanımdaki düşüş ise uygun işlem parametreleriyle asgari düzeyde tutulabilmektedir (Tjeerdsma vd., 1998). Günümüzde modifiye edilmiş ahşap, bazı dış mekan uygulamalarında görülmektedir (Zelinka vd., 2019).

Ahşap malzeme teknolojilerinde sürdürülebilirlik performansı etkili olmaktadır. Ahşabın doğal ve yenilenebilir bir malzeme olması, tasarım ve üretim süreçlerinde enerji etkinliği ve atık azaltma gibi performans parametreleri kapsamında değerlendirilmektedir. Kütle ahşabın üretildiği kereste, tuğla, beton ve çeliğe kıyasla enerji verimliliği yüksek bir malzemedir (Leskovar vd., 2013). Malzeme üretim sürecinde diğer yapı malzemelerine göre çok daha az enerji ile işlenerek çevresel etkisi minimum düzeyde kalmaktadır. Mühendislik ahşap ürünleri arasında yer alan CLT, glulam, LVL ve NLT yüksek karbon depolama kapasitesine sahip olmaları ve yenilenebilirlik özellikleriyle inşaat sektöründe sürdürülebilir alternatifler olarak rol almaktadır (Mayo, 2015). Ayrıca, dijital tasarım ve otomasyon teknolojileri ile ahşap elemanlar, uygun ölçülerde ve minimum atıkla üretilmekte, böylece enerji etkinliği sağlanmaktadır. Prefabrik CLT gibi yapı sistemleri de düşük seviyede atık oluşumu, kolay kurulum ve hızlı montaj imkanı sunmaktadır (Harte, 2017).

Ahşap yapı teknolojileri, atık azaltma konusunda etkilidir. Endüstriyel ahşap üretim süreçlerinde, CNC makinelerin yanı sıra modüler yapı ve panel sistemlerin devreye girmesi ile her bir ahşap eleman optimize edilmekte, kesim sırasında ortaya çıkan malzeme kayıpları en aza indirilmektedir. Kullanılmış ahşaplar ise geri dönüştürülerek yeniden kullanılabilmektedir (Hoadley vd., 2000).

Bu çalışmada ahşap teknolojilerinin sınıflandırılması ve performans kriterlerine etkisinin değerlendirilmesinin yanı sıra bu teknolojilere yönelik performans değerlendirme çerçevesi geliştirilmiştir. Her teknoloji grubunun süreç ile kurduğu ilişki, bu süreçlerden doğan performans kriterlerine doğrudan etki etmektedir. Bu bağlamda,

Katman 1- Teknolojiler (mavi düğümler)

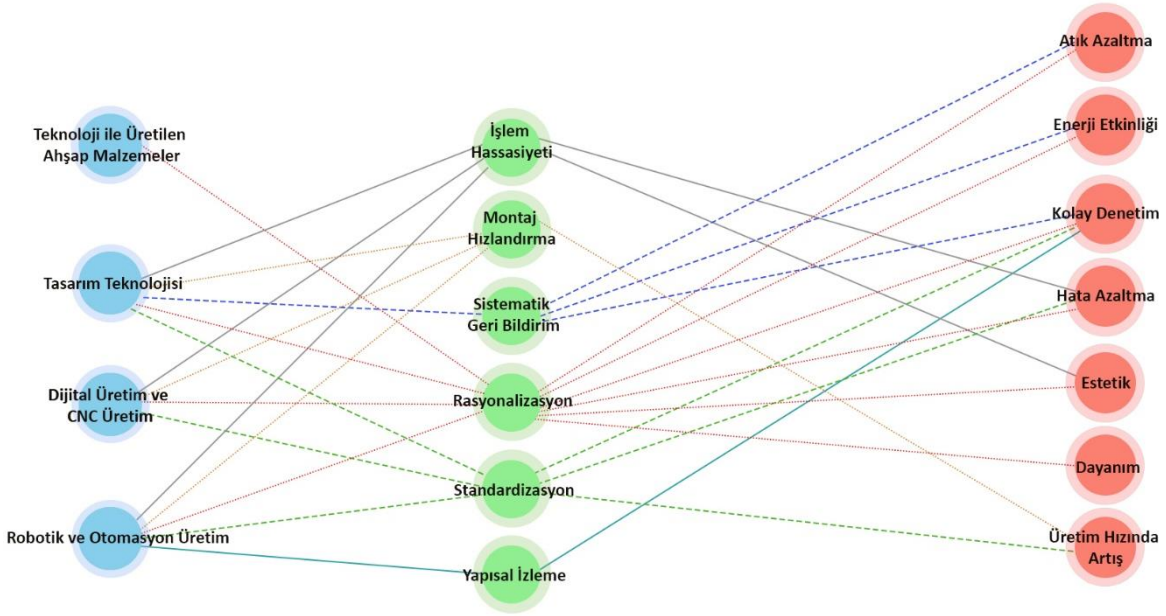
Katman 2- Süreçler (yeşil düğümler)

Katman 3- Performans kriterleri (turuncu düğümler) olarak üç katmanlı yapı ile etkileşim ifade edilmiştir.

Şekil 5'te, ahşap teknolojileri dört ana grup halinde ifade edilmiştir. Teknolojilerin etkileşimde olduğu süreçler ve bu süreçlerin hangi performans kriterlerine katkı sağladığı, aynı renk oklar kullanılarak görselleştirilmiştir. Burada, her teknoloji kendi sürecine bağlanmakta ve süreçlerin katkı sağladığı performans kriterlerine yönelmektedir. Örneğin;

CNC teknolojisi → İşlem Hassasiyeti Süreci→ Hata Azaltma + Estetik

Robotik ve Otomasyon Üretim → Standardizasyon Süreci→ Kolay Denetim + Hata Azaltma + Üretim Hızı Artışı (Şekil 5).



Şekil 5. Ahşap teknolojilerinin süreç ve performans kriterleri arasındaki ilişkileri.

Bu çalışmada, teknolojiler, süreçler ve performans çıktıları arasında akışı sağlayan ilişkiler sistematik bir şekilde analiz edilmiştir. Özellikle parametrik tasarım ve BIM gibi teknolojiler ile geri bildirim döngüsü kurularak tasarım aşamasında yapılan hatalar önceden tespit edilebilmekte, bu sayede kalite kontrol, üretim hızı, güvenlik ve dayanıklılık artırılmaktadır. Standardizasyon ve rasyonalizasyon, ahşap teknolojilerinde birbiriyle yakından ilişkili kavramlar olarak hem üretim verimliliğini hem de sürdürülebilirliği desteklemektedir. Bu iki kriter birlikte organize edildiğinde, kalite kontrolü kolaylaşmakta, maliyetler azaltılmakta ve üretim süreçleri hızlandırılmaktadır. Sonuç olarak, ahşap teknolojileri için belirlenen performans kriterleri birbirini etkileyen süreçler üzerinden tanımlanmakta ve bu ilişkiler, tasarımdan üretime kadar olan tüm aşamaları etkilemektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, ahşap teknolojilerinin mimari tasarım ve üretim süreçlerindeki yerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiş, literatür taramasıyla bu alanda kullanılan teknolojiler belirlenmiş ve performans kriterlerine göre bir sınıflandırma önerilmiştir. Elde edilen bulgular, ahşap teknolojilerinin geleneksel yöntemlerden farklı olarak süreci daha verimli, hassas ve sürdürülebilir kılma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışmada tasarım ve üretim açısından ahşap teknolojileri ayrı değerlendirilmiş; dijital üretim, CNC, prefabrikasyon, robotik sistemler ve otomasyon gibi teknolojiler bu kapsamda incelenmiştir. Bu sınıflandırma ile teknolojiler üzerinde analiz yapmak daha kolaylaştırılmış, teknoloji seçimi konusunda değerlendirme yapabilme avantajı sağlanmıştır.

Tasarım süreçleri açısından değerlendirildiğinde, ahşap teknolojilerinde atık azaltma, hata azaltma ve üretim hızında artış parametreleri öne çıkmaktadır. Bu durum, ahşap teknolojilerinin tasarım sürecinin yanında üretim aşamasında da zaman, maaliyet ve malzeme tasarrufu sağlamasına katkı sunduğunu göstermektedir. Üretim açısından ele alındığında ise, işlem hassasiyeti, montaj kolaylığı, standardizasyon ve enerji etkinliği gibi performans ölçütleri dikkat çekmektedir. Dijital üretim teknikleri, CNC teknolojisi, prefabrikasyon, robotik ve otomasyon açısından üretim teknolojileri üretim sürecini hızlandırırken; bilgisayar, robotik destekli kesim ve montaj sistemleri hata oranını azaltmakta, kaliteyi artırmaktadır.

Çalışmada önerilen sınıflandırma ile, ahşap teknolojisine yönelik performans kriterleri belirlenmiş ve bu teknolojiden beklenen kriterlerin değerlendirilmesiyle karar vericilere teknoloji seçiminde rehberlik sağlayabileceği öngörülmüştür. Özellikle işlem hassasiyeti, montaj hızlandırma, rasyonalizasyon, standardizasyon gibi süreçler, ahşap teknolojilerinin avantajlarını ve dezavantajlarını analiz etme konusunda yol göstermektedir.

Çalışma, ahşap teknolojilerinin sürdürülebilirlik ilkeleriyle güçlü biçimde örtüştüğünü de göstermektedir. Prefabrikasyon teknolojileri, modüler yapım ve panel sistemleri ile malzeme israfı azaltılarak çevre dostu yaklaşım benimsenmektedir. Ahşap yapı elemanlarının fabrika ortamında üretilmesi ile hem atık miktarı azaltılabilmekte hem de oluşan atıklar geri dönüşüm ile yeniden kullanılabilmektedir. Bu yönüyle ahşap teknolojileri, sürdürülebilir yapı üretiminde önemli olmaktadır.

Dijital tasarım ve üretim teknolojilerinin yaygınlaştırılması, hata oranlarının azaltılmasına ve üretim hızının arttırılmasına katkı sağlamaktadır. Ahşap teknolojilerinde standardizasyonun sağlanması, tasarım ve üretim süreçlerinin daha sistematik, optimize ve kalite odaklı hale getirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, atık azaltma ve enerji etkinliği kriterleri, sürdürülebilir bir sistem modeli için daha çok öne çıkarılmalıdır.

Sonuç olarak, köklü bir geçmişi olan ahşabın, günümüzde tasarım ve üretim teknolojileri ile gündeme gelmesi, malzemenin potansiyelinin hala keşfedilmekte olduğunu göstermektedir. Bu durum, ahşabın sadece bir yapı malzemesi olmadığını göstererek bulunduğu dönemin teknolojik ve estetik bir yansıması haline geldiğini anlatmaktadır. Böylece ahşap, bulunduğu dönem için bir ifade aracı olma görevini üstlenmektedir. Bu çalışmada tasarım ve üretim teknolojilerinin bütüncül biçimde değerlendirilmesiyle geliştirilen sınıflandırma çerçevesinin hem literatüre hem de sektörel uygulamalara katkı sunacağı düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda, bu sınıflandırmanın uygulayıcı görüşleriyle test edilmesi ve farklı bağlamlarda geliştirilmesi önerilmektedir.

Etik Standartlara Uyum

Çıkar Çatışması: Yazarlar, üçüncü kişiler ve kurumlar arasında herhangi bir çıkar çatışmasının bulunmadığını veya varsa bu çatışmanın hangi koşullarda ortaya çıktığını ve nasıl çözüme kavuşturulacağını açıklayan beyanlar ile yazar katkısı bildirim formları, makale süreç dosyalarına ıslak imzalı şekilde eklenmiştir.

Etik Kurul İzni: Bu çalışma için etik kurul iznine gerek yoktur. Buna ilişkin ıslak imzalı onam formu, makale süreç dosyasına eklenmiştir.

Finansal Destek: Bu çalışma, Gebze Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2025-A-101-02 numaralı *"Ahşap Yapı Tasarım ve Üretiminde CAD ve BIM Tabanlı Dijital Araçların Evrimi: Ulusal ve Uluslararası Perspektiften Bir Karşılaştırma"* başlıklı proje kapsamında finansal olarak desteklenmiştir.

Teşekkür: Bu çalışmanın yürütülmesine olanak sağlayan 2025-A-101-02 numaralı proje desteği için Gebze Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız. Bu çalışma söz konusu projenin bir parçası olarak geliştirilmiştir.

KAYNAKÇA:

Aicher, S., Reinhardt, H. W., & Garrecht, H. (Eds.). (2013). Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology.

Arslan, R., Özdemir, T., & Akyüz, İ. (2017). TÜRKİYE MOBİLYA SEKTÖRÜ AÇISINDAN TASARIM SÜRECİNDE BİLGİSAYAR KULLANIMININ ÖNEMİ VE SEKTÖRE YÖNELİK BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM (CAD) YAZILIMLARININ İNCELENMESİ. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, *6*(3), 1105-1118.

Bagheri, S., Alinejad, M., Ohno, K., Hasburgh, L., Arango, R., & Nejad, M. (2022). Improving durability of cross laminated timber (CLT) with borate treatment. *Journal of Wood Science*, *68*(1), 34.

Bekiroğlu, B., Alaçam, S., & Güzelci, O. Z. (2024) Tarihi Ahşap Yapı Bileşenlerinin Belgelenmesi ve CNC ile Yeniden Üretimi.

Bierach, C., Coelho, A. A., Turrin, M., Asut, S., & Knaack, U. (2023). Wood-based 3D printing: Potential and limitation to 3D print building elements with cellulose & lignin. *Architecture, Structures and Construction*, *3*(2), 157-170.

Bianconi, F., & Filippucci, M. (2019). *Digital wood design*. Cham: Springer International Publishing.

Buri, H. U., & Weinand, Y. (2011). The tectonics of timber architecture in the digital age. *Building with Timber Paths into the Future*, 56-63.

Buswell, R. A., Soar, R. & Thorpe, A., (2007), Freeform Construction, Automation in Construction, C.16, S.2, 224-231.

Calquin, D. L., Mata, R., Correa, C., Núñez, E., Bustamante, G., Caicedo, N., ... & Roa, L. (2024). Implementation of BIM Technologies in Wood Construction: A Review of the State of the Art From a Multidisciplinary Approach.

Coşkun,B.,Yardımlı,S .(2022). Endüstriyel ahşap malzemenin yapıda kullanımı; Cambridge Merkez Camisi. KAPU Trakya Journal of Architecture and Design, 2(1), 20-34.

Çakıroğlu, E. O., Taşdemir, T., & Çakıroğlu, B. (2023). Geleneksel türk mimarisi motiflerinin 3D CNC teknolojisi ile ahşap kapılarda tasarımı ve uygulanması: Bafra Kongre Merkezi Örneği. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, *19*(2), 143-162.

Çalışkan, Ö., Meriç, E., & Yüncüler, M. (2019). Ahşap ve Ahşap Yapıların Dünü, Bugünü ve Yarını. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6(1), 109-118.

Çırpı, M. E., & Öner, D. (2021). Mimarlıkta Bilgisayar Destekli Fabrikasyon Teknolojileri ve Kullanım Yaklaşımları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *9*(2), 943-956.

Das, A. K., Agar, D. A., Rudolfsson, M., & Larsson, S. H. (2021). A review on wood powders in 3D printing: Processes, properties and potential applications. *Journal of materials research and technology*, *15*, 241-255.

Duarte, J. P. (2005). "A Discursive Grammar for Customizing Mass Housing: The Case of Siza's Houses at Malagueira." *Automation in Construction*, 14(2), 265-275.

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. Wiley.

Fréchard, V., Bléron, L., Meyer, J., Besançon, F., & Duchanois, G. (2023, June). Stratoconception®, an additive manufacturing process for timber architecture: challenges and opportunities. In *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)* (pp. 9-22).

Gramazio, F., Kohler, M., & Willmann, J. (2014). The Robotic Touch: How Robots Change Architecture. *Park Books*.

Harte, A. M. (2017). Mass timber – the emergence of a modern construction material. *Journal of Building Engineering, 12*, 215-230.

İpek, Y. (2014). Hesaplamalı tasarım yaklaşımları: Bütünleşik bir tasarım önerisi.

Kaçmaz, Ş. (2019). Parametrik Tasarım ve BIM. *Yapı Bilgi Modelleme*, *1*(1), 3-9.

Kitek Kuzman, M., & Sandberg, D. (2017). Comparison of timber-house technologies and initiatives supporting use of timber in Slovenia and in Sweden-the state of the art. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, *10*(6), 930.

Kolarevic, B. (2003). Architecture in the digital age. *Design and Manufacturing. Nueva York-Londres: Spon Press-Taylor & Francis Group*.

Kunic, A., Kramberger, A., & Naboni, R. (2021). Cyber-physical robotic process for re-configurable wood architecture: Closing the circular loop in wood architecture. In *39th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, eCAADe 2021* (pp. 181-188). Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe.

Llatas, C., Quiñones, R., & Bizcocho, N. (2022). Environmental impact assessment of construction waste recycling versus disposal scenarios using an LCA-BIM tool during the design stage. *Recycling*, *7*(6), 82.

Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., & Rüther, P. (2016). "Additive Construction: State-of-the-Art, Challenges and Opportunities." *Automation in Construction*, 72, 347-366.

Leskovar, V. Z., & Premrov, M. (2013). *Energy-efficient timber-glass houses*. Springer Science+ Business Media.

Lobos Calquin, D., Mata, R., Correa, C., Nuñez, E., Bustamante, G., Caicedo, N., ... & Roa, L. (2024). Implementation of Building Information Modeling Technologies in Wood Construction: A Review of the State of the Art from a Multidisciplinary Approach. *Buildings*, *14*(3), 584.

Mayo, J. (2015). *Solid wood: case studies in mass timber architecture, technology and design*. Routledge.

Natterer, J., KESSEL, M., & DE WOLF, A. (1986). *Le bois et l'informatique*.

Nawari, N. (2012). BIM standardization and wood structures. *Computing in Civil Engineering (2012)*, 293-300.

Premrov, M., & Žegarac Leskovar, V. (2023). Innovative structural systems for timber buildings: A comprehensive review of contemporary solutions. *Buildings*, *13*(7), 1820.

Poirier, E. A., Forgues, D., & Staub-French, S. (2019). "Assessing the Performance of BIM in Building Design Stages: Application to Fire Safety and Structural Integrity in Timber Structures." *Automation in Construction*, 104, 76-88.

Pottmann, H., Eigensatz, M., Vaxman, A., & Wallner, J. (2015). Architectural geometry. *Computers & graphics*, *47*, 145-164. Strauss H., (2013). AM Envelope- ThePotential of Additive Manufacturing for Facade Construction, Faculty of Architecture, Delft University of Technology.

Şişman, M. E. (2018). *Amerika Birleşik Devletleri'nde ahşap evin gelişimi ve prefabrik ahşap ev katalogları* (Master's thesis, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü).

Tannert, T., Schmidt, D., & Lam, F. (2008). CNC timber processing in research and teaching. In *Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology* (pp. 1-9).

Torniainen, P., Jones, D., & Sandberg, D. (2021). Colour as a quality indicator for industrially manufactured ThermoWood®. *Wood Material Science & Engineering*, *16*(4), 287-289.

Tjeerdsma, B. F., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P., & Militz, H. (1998). Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh-und Werkstoff*, *56*(3), 149-153.

Wieruszewski, M., & Mazela, B. (2017). Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Form of Construction Wood. *Wood Industry/Drvna Industrija*, *68*(4).

Wójcik, M. (2020). Reframing wood construction: Innovation in architecture through activating material properties with the use of digital technologies.

Zelinka, S. L., Passarini, L., Matt, F. J., & Kirker, G. T. (2019). Corrosiveness of thermally modified wood. *Forests*, *11*(1), 50.

Żmijewki, T., & Wojtowicz-Jankowska, D. (2017). Timber-Material of the future-Examples of small wooden architectural structures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 245, No. 8, p. 082019). IOP Publishing.

EXTENDED SUMMARY

Research Problem:

Wood technologies provide significant advantages with digitalization and innovative approaches in design and production processes. These technologies facilitate the achievement of goals such as sustainability, reduction of error rates and increase in production speed. However, in order to evaluate these advantages in detail and to eliminate the existing disadvantages, the processes need to be examined with a more comprehensive analysis. In particular, there is not yet sufficient information other than mass wood on the compliance of wood materials produced with the help of technology with performance criteria, the problems encountered in the production phase and how these technologies can be integrated into sectoral applications. In this context, a detailed examination of the effects of wood technologies related to design and production processes and ensuring their more efficient use in line with performance criteria is a research problem for this study.

Research Questions:

What are the effects of wood technologies on design and production processes and the contributions of these technologies to sustainable architecture in line with performance criteria?

Literature Review

Recent studies on wood technologies draw attention to the importance of digitalization and innovative methods in design and production processes as well as the use of innovative materials. Aicher et al. (2013) evaluated the developments in material and assembly technologies of wooden structures, while Bianconi and Filippucci (2019) emphasized the role of digital design tools in wood applications. Çırpı and Öner (2021) focused on the use of computer-aided fabrication technologies in architecture. In addition, Bagheri et al. (2022) examined innovative methods to increase the durability of wooden materials, while Bierach et al. (2023) addressed the potential and limitations of wood-based 3D printing technologies. Poirier et al. (2019) draw attention to the advantages of building information modeling (BIM) technologies in terms of fire safety and structural integrity in wooden structures. These studies and others reveal that analyzing wood technologies in line with performance criteria has great potential in terms of sustainability and innovative design goals. While the literature emphasizes the current advantages of technological developments in this field, it also highlights the challenges to their applicability.

Methodology:

The aim of the study is to optimize the design and production processes by determining the suitability of technologies for the needs using the systematic literature analysis method. The role of wood technologies in architectural design and production processes is addressed with a multi-layered analysis method. The classification and evaluation of wood technologies according to performance criteria provides a framework for understanding the usage potential and advantages of these technologies.

Conclusions

Wood technologies stand out as an important area that should be evaluated within the framework of innovative approaches, process and performance criteria offered in design and production processes. While studies in the literature emphasize the advantages offered by wooden structures in terms of durability, sustainability and aesthetics, they draw attention to the contributions provided by material, digital design and production technologies in these processes. In particular, the accuracy, convenience, speed and quality increase provided by technologies such as computer-aided design (CAD), building information modeling (BIM) and digital simulation on wooden structures have an important place in modern architectural applications. However, the limitations and obstacles encountered in the application processes of these technologies are considered as problems that need to be solved in the development of the wood sector.

In addition to the positive aspects of wood technologies, more research is needed to eliminate the disadvantages in terms of processes and performance criteria. In this context, the relationship between wood technologies and criteria such as sustainability, error reduction and design flexibility indicates a wide potential for both academic and architectural sectors. As a result, in order to use these technologies more effectively, processes need to be examined in a comprehensive and detailed framework and studies on modern applications need to be increased.