

# ORMAN ENDÜSTRİSİNDE YENİLİKÇİ TEKNOLOJİLER VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKLAŞIMLAR

EDİTÖR:  
HUREM DUTAL



**BİDGE Yayınları**

**Orman Endüstrisinde Yenilikçi Teknolojiler ve Sürdürülebilir Yaklaşımlar**

**Editör:** HUREM DUTAL

**ISBN:** 978-625-8821-11-6

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-06-25

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](http://www.bidgeyayinlari.com.tr) - [bidgeyayinlari@gmail.com](mailto:bidgeyayinlari@gmail.com)

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

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



## ÖNSÖZ

Orman endüstrisi, yenilenebilir doğal kaynakların katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi, sürdürülebilir üretim sistemlerinin geliştirilmesi ve çevresel sorunlara yenilikçi çözümler sunulması açısından stratejik öneme sahip bir bilim ve uygulama alanıdır. Günümüzde iklim değişikliği, artan karbon emisyonları ve doğal kaynaklar üzerindeki baskı, orman kaynaklarının daha verimli, çevre dostu ve sürdürülebilir bir anlayışla değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu doğrultuda, mühendislik ürünü ahşap malzemeler, biyobazlı teknolojiler ve karbon yönetimine katkı sağlayan biyolojik süreçler, bilimsel araştırmaların öncelikli çalışma alanları arasında yer almaktadır.

“Orman Endüstrisinde Yenilikçi Teknolojiler ve Sürdürülebilir Yaklaşımlar” başlıklı bu eser, orman endüstrisi alanında seçilmiş güncel araştırma konularını ve sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımları bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Kitap kapsamında, son yıllarda yapı sektöründe giderek daha fazla kullanım alanı bulan çapraz lamine ahşap (Cross-Laminated Timber, CLT) panellerin yangın performansını artırmaya yönelik uygulamalar ile empenye işlemlerinin teknolojik özellikler üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Bunun yanında, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir öneme sahip olan karbon sekestrasyonu sürecinde mikorizal mantarların rolü değerlendirilerek, toprakta karbon depolanmasını kontrol eden biyolojik mekanizmalar ve bunların sürdürülebilir çevre yönetimine katkıları incelenmiştir. Farklı disiplinlerden beslenen bu çalışmalar, bir yandan mühendislik ürünü ahşap malzemelerin performans, dayanıklılık ve kullanım olanaklarına odaklanırken, diğer yandan karbon döngüsü, toprak süreçleri ve sürdürülebilir çevre yönetimi gibi seçilmiş güncel araştırma konularını ele almaktadır. Bu yönüyle kitap, yenilikçi ahşap teknolojileri ile sürdürülebilirlik temelli biyolojik süreçleri bir araya getirerek orman endüstrisinin güncel araştırma alanlarına ilişkin bütüncül bir perspektif sunmaktadır.

Bu eserin, ilgili alanlarda 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

Haziran 2026

## İÇİNDEKİLER

ÇAPRAZ LAMİNE AHŞAP (CLT) PANELLERİN  
TEKNOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE EMPRENYE  
İŞLEMİNİN ETKİLERİ ..... 1

*İBRAHİM SUSAN, OKAN İLHAN, AYDIN DEMİR*

ÇAPRAZ LAMİNE AHŞAP (CLT) PANELLERDE YANGIN  
GECİKTİRİCİ UYGULAMALARIN PERFORMANS  
ÜZERİNE ETKİLERİ ..... 27

*OKAN İLHAN, ABDULLAH UĞUR BİRİNCİ, AYDIN DEMİR*

KARBON SEKESTRASYONUNDA MİKORİZANI ROLÜ ... 51

*MERAL ÖDEMİŞ, BÜLENT TOPRAK, ÇİĞDEM KÜÇÜK*

# BÖLÜM 1

## ÇAPRAZ LAMİNE AHŞAP (CLT) PANELLERİN TEKNOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE EMPRENYE İŞLEMİNİN ETKİLERİ

**İBRAHİM SUSAN<sup>1</sup>**  
**OKAN İLHAN<sup>2</sup>**  
**AYDIN DEMİR<sup>3</sup>**

### Giriş

İnşaat sektöründe sürdürülebilir yapı anlayışının yaygınlaşmasıyla birlikte, çevresel etkileri düşük ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen yapı malzemelerine olan ilgi her geçen yıl artmaktadır (Li & Hadigheh, 2025: 1). Özellikle üretim süreçlerinde yüksek enerji tüketimi ve karbon salımıyla ilişkilendirilen beton ve çelik gibi geleneksel yapı malzemelerine alternatif olarak mühendislik ahşap ürünleri (Engineered Wood Products, EWP)

---

<sup>1</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Odun Mekaniği ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0009-7826-7729

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> Doçent Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Odun Mekaniği ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0003-4060-2578

dikkat çekmektedir (Abed & ark., 2022: 2). Mühendislik ürünü ahşap ürünlerin geliştirilmesinden önce, inşaatçılar genellikle gerekli boyutsal stabiliteye ve homojenliğe sahip olmayan büyük, masif keresteler kullanmaktaydı (Çolak, Çolakoğlu & Aydın, 2007: 1). Bu yüzden yüksek açıklıklı ve boyutsal stabilitenin sağlanması için EWP'ler geliştirilmiştir. Bu ürünler arasında yer alan çapraz lamine ahşap (Cross-Laminated Timber, CLT), katmanlarının birbirine dik yönde yerleştirilmesiyle oluşturulan yapısı sayesinde yüksek taşıma kapasitesi, boyutsal kararlılık ve yapısal dayanım sağlayabilmektedir (Sharifnia & Hindman, 2017: 314). Bu özellikleri sayesinde CLT, yalnızca düşük katlı yapılarda değil, çok katlı modern yapı sistemlerinde de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Nitekim Forte (Avustralya), Stadthaus (İngiltere), Brock Commons (Kanada) ve Britanya Kolombiya Üniversitesi'ndeki 18 katlı Brock Commons Tallwood House gibi projeler, CLT'nin büyük ölçekli yapılarda başarılı bir şekilde uygulanabildiğini göstermektedir (Brandner & ark., 2016: 331; Siddika & ark., 2021: 3). Çapraz lamine ahşap (CLT), sürdürülebilir olması, enerji verimliliği ve yapım hızı ile ilgili mükemmel özellikleri nedeniyle, diğer yapısal malzemelere giderek artan bir şekilde daha uygun bir alternatif haline gelmiştir (Birinci & ark., 2020: 1). Özellikle 1990'lı yıllardan itibaren Avrupa'da hızla gelişim gösteren CLT teknolojisi, ANSI/APA PRG 320 (2019) standardının yürürlüğe girmesiyle birlikte Kuzey Amerika'da da yaygın kabul görmeye başlamıştır (Jerves & ark., 2023: 1). Tüm bu gelişmeler, CLT'nin modern yapı teknolojilerinde çevreci, sürdürülebilir ve yüksek performanslı bir yapı malzemesi olarak önemli bir yere sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte CLT, ahşabın doğal yapısından kaynaklanan bazı dezavantajlara da sahiptir. Ahşap esaslı bir malzeme olması nedeniyle nem, çürüme mantarları, termitler ve diğer biyolojik etkenler karşısında hassasiyet gösterebilmektedir. Özellikle dış

ortam koşullarında veya toprakla temas eden uygulamalarda bu durum, yapının dayanıklılığını ve hizmet ömrünü olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Wang & ark., 2018: 117; Cappellazzi & ark., 2020: 351). Bu nedenle CLT panellerin biyolojik bozulmalara karşı korunabilmesi amacıyla çeşitli emprenye ve koruyucu işlemler uygulanmaktadır (Udele & ark., 2023: 2). Ancak uygulanan bu işlemler yalnızca dayanıklılığı değil, aynı zamanda ahşabın yüzey özelliklerini de değiştirebilmektedir.

Yüzeyin fiziksel ve kimyasal yapısındaki bu değişimler, yapıştırıcı ile ahşap arasındaki etkileşimi etkileyerek bağ dayanımında düşüşe ve delaminasyon oranlarında artışa neden olabilmektedir (Lisperguer & Becker, 2005: 113; Lorenz & Frihart, 2006: 90). Özellikle yuvarlanma kesme dayanımı, elastikiyet modülü ve eğilme direnci gibi taşıyıcı sistem güvenliği açısından kritik mekanik özelliklerin bu durumdan doğrudan etkilenebildiği belirtilmektedir (Lim & ark., 2020a : 2). Bu nedenle koruyucu işlemlerin yalnızca biyolojik dayanıklılık açısından değil, aynı zamanda CLT panellerin mekanik performansına etkileri bakımından da birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, koruyucu işlemlerin CLT paneller üzerindeki fiziksel ve mekanik etkilerini daha ayrıntılı biçimde ortaya koymaya başlamıştır. Quin & ark., (2025: 3774), mikronize bakır azol uygulamasının kesme dayanımını önemli ölçüde etkilemediğini, ancak bağ dayanımını artırarak delaminasyon oranlarını düşürdüğünü bildirmiştir. Quin & ark., (2024: 326) tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise üretimi tamamlanmış CLT panellerin bakır bazlı koruyucularla emprenye edilmesinin yapısal bütünlüğü koruyarak uygulanabilir bir yöntem olduğu ifade edilmiştir. Adnan & ark., (2021: 285), alkali bakır kuaterner (ACQ) işleminin Malezya kökenli sert ağaçlarda yüzey pürüzlülüğünü artırmasına rağmen yapıştırma performansını olumsuz etkilemediğini belirtmiştir. Lim & ark., (2020a :8, 2020b:

9) tarafından yürütülen çalışmalarda ise MCA-C ile işlem görmüş CLT panellerde koruyucu emdirme düzeyi ve yapıştırıcı türünün bağ performansı üzerindeki etkileri araştırılmış; poliüretan bazlı yapıştırıcıların daha başarılı sonuçlar verdiği ve mekanik özelliklerdeki farklılıkların istatistiksel açıdan anlamlı olmadığı ortaya konmuştur. Borat bazlı işlemler üzerine yapılan araştırmalarda Taylor & ark., (2023: 29), vakum yöntemiyle uygulanan borat çözeltisinin etkili bir koruma sağladığını ve mekanik özelliklerde belirgin bir bozulmaya neden olmadığını rapor etmiştir. Ayanleye & ark., (2023: 11) ise bakır azol C formülasyonunun yüksek tutum ve penetrasyon sağladığını, özellikle boyuna yerleşimli panellerde daha etkili sonuç verdiğini vurgulamıştır. Bagheri & ark., (2022: 15), borat işlemlerinin çürüme, termit ve yangına karşı dayanımı artırdığını ve yapışma mukavemetini olumsuz etkilemediğini belirtirken; Wainscott & ark., (2024: 195), borat uygulamalarının yüzey ıslanabilirliğini artırarak delaminasyon riskini yükseltebildiğini ifade etmiştir. Aynı çalışmada PTIP (Propiconazole–Tebuconazole–Imidacloprid–Permethrin) içerikli işlemlerin ise daha düşük delaminasyon oranı ve daha iyi reçine penetrasyonu sağladığı bildirilmiştir. Tüm bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, CLT panellerde kullanılacak koruyucu işlemlerin yalnızca biyolojik dayanıklılığı artırmaya yönelik değil, aynı zamanda mekanik performansı koruyacak şekilde seçilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Koruyucu kimyasalın türü, uygulama yöntemi, retensiyon seviyesi ve kullanılan yapıştırıcı sistemi arasındaki uyum, panelin uzun dönem performansı açısından kritik öneme sahiptir. Uygun koşullarda gerçekleştirilen koruyucu işlemler CLT panellerin hizmet ömrünü uzatabilirken, yanlış kombinasyonlar mekanik zayıflıklara ve yapısal güvenlik problemlerine neden olabilmektedir. Bu nedenle farklı kullanım koşulları ve iklim şartları altında CLT'nin hem biyolojik dayanıklılığını hem de mekanik performansını dengeli biçimde koruyabilecek çözümlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar önemini sürdürmektedir.

Literatürde koruyucu emprenye işlemlerinin CLT panellerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunmasına rağmen, mevcut araştırmaların büyük bölümü sınırlı sayıdaki kimyasal madde ve belirli retensiyon seviyeleri üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada ise güncel literatür kapsamlı şekilde incelenmiş, emprenye işlemlerinin çapraz lamine ahşap (CLT) panellerin teknolojik özellikleri üzerindeki etkileri derlenmiş ve elde edilen bulgular doğrultusunda çeşitli değerlendirme ve öneriler sunulmuştur.

### **CLT Panellerin Teknolojik Özellikleri Üzerine Etkili Olan Faktörler**

Çapraz lamine ahşap (CLT) panellerin performansı; kullanılan ahşap türü, yapıştırıcı sistemi, üretim parametreleri ve yüzey işlemleri gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Literatürde, özellikle yapışma performansı ve mekanik özellikleri etkileyen bu parametrelerin CLT panellerin uzun dönem dayanıklılığı açısından önemli olduğu belirtilmektedir (Syahirah & ark., 2025: 10).

CLT üretiminde kullanılan yapıştırıcı türü, panel performansını doğrudan etkileyen temel unsurlardan biridir. Poliüretan (PUR), melamin üre formaldehit (MUF), fenol rezorsinol formaldehit (PRF) ve emülsiyon polimer izosiyanat (EPI) esaslı tutkallar yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle PUR tutkallarının iyi yapışma performansı sağladığı, PRF tutkallarının ise dış ortam dayanımı açısından öne çıktığı belirtilmiştir (Sikora & ark., 2016: 142; Mohd Yusof & ark., 2019: 10). Bunun yanında yapıştırıcının uygulanma miktarı da önemlidir. Yetersiz tutkal kullanımı zayıf bağ oluşumuna neden olurken, aşırı miktarlar ekonomik kayıplara ve yapışma problemlerine yol açabilmektedir (Malanit & ark., 2009: 367; Ren & ark., 2019: 4).

Üretim sırasında uygulanan pres basıncı da CLT'nin mekanik performansı üzerinde etkili olmaktadır. Düşük basınç yapıştırıcının yüzeye yeterince nüfuz etmesini engellerken, aşırı basınç ise tutkalın yüzeyden dışarı çıkmasına neden olabilmektedir (Brandner, 2013: 8). Özellikle yüksek yoğunluklu ağaç türlerinde daha yüksek pres basıncına ihtiyaç duyulduğu ifade edilmektedir (Frihart & Hunt, 2010: 22). Ayrıca ahşabın yoğunluğu ve anatomik yapısı da yapıştırıcının odun içerisine nüfuzunu etkileyerek bağ dayanımını değiştirebilmektedir. Düşük yoğunluklu türlerde yapıştırıcı daha kolay emilirken, yüksek yoğunluklu türlerde penetrasyon zorlaşabilmektedir (Hovanec, 2015: 8; Yörür, 2018: 102).

CLT üretiminde yüzey özellikleri de önemli rol oynamaktadır. Yüzey ıslanabilirliği, yapıştırıcının yüzeye homojen yayılmasını ve güçlü bağ oluşmasını sağlarken; uygun yüzey pürüzlülüğü yapıştırıcının mekanik tutunmasını artırabilmektedir (Kamke & Lee, 2007: 216-217; Baldan, 2012: 108). Karliati & ark., (2019: 8246), yüzey pürüzlülüğündeki artışın kesme dayanımını olumlu etkilediğini bildirmiştir.

Bunun yanında çevresel koşullar da CLT panellerin uzun dönem performansını etkileyebilmektedir. Nem ve sıcaklık değişimleri sonucunda ahşapta meydana gelen şişme ve daralma hareketleri zamanla delaminasyona neden olabilmektedir (Viana & ark., 2017).

Uzun süreli mekanik yüklerin ise yapıştırıcı tabakasında yorulma oluşturarak panel dayanımını azaltabileceği belirtilmektedir (Stoeckel & ark., 2013: 34).

Emprenye, boya ve vernik gibi yüzey işlemleri de CLT panellerin performansı üzerinde etkili olan diğer önemli faktörlerdir. Koruyucu emprenye işlemleri biyolojik dayanıklılığı artırmasına rağmen, ahşap yüzeyinin fiziksel ve kimyasal yapısını değiştirerek yapışma performansını etkileyebilmektedir. Özellikle bakır bazlı

koruyucuların yüksek retansiyon seviyelerinde yapıştırıcı penetrasyonunu azaltabildiği ve bağ dayanımını olumsuz etkileyebildiği belirtilmiştir (Lisperguer & Becker, 2005: 115; Lim & ark., 2020a: 1). Buna karşılık uygun seviyelerde uygulanan borat bazlı işlemlerin biyolojik dayanıklılığı artırırken mekanik özellikler üzerinde önemli bir olumsuzluk oluşturmadığı ifade edilmektedir (Bagheri & ark., 2022: 14-15; Taylor & ark., 2023: 8-9).

Boya ve vernik uygulamalarının ise yüzey pürüzlülüğü ve ıslanabilirlik üzerinde etkili olduğu belirtilmektedir. Belirli düzeyde yüzey pürüzlülüğünün kaplama malzemelerinin tutunmasını artırdığı, ayrıca yüzey işlemlerinin su alma davranışını azaltarak dış ortam dayanıklılığına katkı sağladığı ifade edilmektedir (Baldan, 2012: 104). Son yıllarda geliştirilen nano kaplama ve hidrofobik yüzey modifikasyonlarının da CLT yüzeyinde su iticiliğini artırarak hava koşullarına karşı daha yüksek dayanım sağladığı bildirilmektedir.

### **CLT Panellerin Teknolojik Özellikleri Üzerine Emprenye İşleminin Etkileri**

Yaygın olarak kullanılan birçok ağaç türü, ahşap çürüten organizmaların gelişimine uygun çevresel koşullara maruz kaldığında zamanla bozulmaya uğrayabilmektedir. Bu nedenle ağaç ürünleri, çürüme mantarları, zararlı böcekler ve deniz organizmalarına karşı kimyasal emprenye maddeleriyle korunmaktadır. Emprenye işlemleri, ahşap yapıların hizmet ömrünü uzatmakta, bakım ve yenileme maliyetlerini azaltmakta ve orman kaynaklarının daha verimli kullanılmasına katkı sağlamaktadır. Sağlanan koruma düzeyi ise kullanılan emprenye maddesinin türüne, ahşap bünyesine nüfuz etme kapasitesine, retansiyon miktarına ve uygulanan yönteme; yani daldırma, vakum-basınç veya püskürtme gibi tekniklere bağlıdır (Lebow, 2010: 12). Son yıllarda geleneksel masif ahşap malzemelerin korunmasına yönelik uygulamaların

yanında, mühendislik ürünü ahşap malzemelerden biri olan çapraz lamine ahşap (CLT) panellerin emprenye edilmesi ve bu işlemin panelin teknolojik özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar da artış göstermektedir.

Ayanleye & ark., (2023: 2), farklı konfigürasyonlarda üretilmiş CLT panellerde bakır bazlı emprenye maddelerinin penetrasyon ve tutunma özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada üç farklı CLT panel tipi ve iki farklı emprenye maddesi kullanılmıştır. Paneller, işleme tesislerine gönderilmeden önce kapalı ortamda saklanmış; CA-C ve MCA işlemleri farklı katman sayılarına ve panel konfigürasyonlarına sahip örnekler üzerinde uygulanmıştır. Böylece hem katman düzeninin hem de panel kalınlığının koruyucu madde penetrasyonu ve tutunması üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. CA-C'nin aktif bileşenleri %96,1 bakır, %1,95 propikonazol ve %1,95 tebukonazol; MCA'nın aktif bileşenleri ise %96,1 bakır ve %3,9 tebukonazol olarak belirtilmiştir (AWPA P48-15, 2017; AWPA P61-16, 2017). Çalışma sonucunda, önceden üretilmiş CLT panellerin bakır-azol esaslı koruyucularla başarılı şekilde işlenebileceği ortaya konmuştur. CA-C, MCA'ya kıyasla daha iyi işlenebilirlik göstermiş ve CLT panellerde daha yüksek bakır penetrasyonu ile tutunma sağlamıştır. Bu nedenle, önceden üretilmiş CLT panellerin korunmasında CA-C'nin daha uygun bir seçenek olabileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte, ilk katmanda yeterli bakır tutunması sağlanmasına rağmen ikinci katmandaki düşük tutunma değerlerinin, CLT uzunluklarının azaltılmasıyla iyileştirilebileceği ifade edilmiştir.

Öztürk & ark., (2025b: 810), doğal dış ortam koşullarında altı ay süreyle kısmen toprağa gömülü olarak bekletilen CuAz ile emprenye edilmiş CLT panellerin kısa dönem dayanıklılığı ve mekanik performansını araştırmıştır. Çalışmada C18 mukavemet sınıfında sarıçam (*Pinus sylvestris L.*) keresteleri ve AWPA P5-21 standardına uygun Bakır Azol Tip C emprenye maddesi

kullanılmıştır. Emprenye işlemi, 7,4, 8,1 ve 9,4 kg/m<sup>3</sup> retansiyon seviyelerine ulaşacak şekilde vakum-basınç yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Kontrol grubu dâhil toplam 32 adet CLT panel üretilmiş ve numuneler hem tahribatlı hem de tahribatsız test protokollerine uygun şekilde hazırlanmıştır. Numuneler açık alanda 100 cm derinliğe kadar kısmen toprağa gömülmüş, altı aylık maruziyet sonunda toprak altı ve toprak üstü bölümlerinden alınan örneklerde yeniden testler yapılmıştır. Çalışmada eğilme direnci, elastikiyet modülü, yapışma direnci, yoğunluk ve vida çekme direnci değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre CuAz uygulaması, CLT'nin toprakla temas koşullarına karşı biyolojik direncini artırmış; inceleme süresi sonunda numunelerde gözle görülür mantar kaynaklı bozulma veya delaminasyon tespit edilmemiştir. Ancak özellikle yüksek retansiyon seviyesinde, yani 9,4 kg/m<sup>3</sup> düzeyinde, eğilme direnci, elastikiyet modülü ve yapışma direncinde anlamlı azalmalar meydana gelmiştir. Vida çekme direncinin işlem sonrası yüzey sertleşmesine bağlı olarak başlangıçta arttığı, ancak saha maruziyeti sonrasında özellikle toprak altında kalan bölgelerde azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.

Bagheri & ark., (2022: 1), CLT panellerin dayanıklılığını artırmak amacıyla bor esaslı emprenye işlemlerinin etkilerini incelemiştir. Çalışmada Douglas göknarı (*Pseudotsuga menziesii*) keresteleri kullanılmış ve CLT paneller üzerine borat çözeltisi püskürtme ve daldırma yöntemleriyle uygulanmıştır. Daldırma yönteminde numuneler %7 konsantrasyonlu sulu DOT (disodyum oktaborat tetrahidrat) çözeltisinde 8, 12, 16, 20 ve 24 saat sürelerle bekletilmiştir. CLT üretiminde poliüretan ve epoksi polimerizasyonu esaslı iki farklı tutkal kullanılmıştır. Kesme dayanımı ASTM D5868, yangın performansı ASTM E1354 ve termit direnci ASTM D3345 standartlarına göre değerlendirilmiştir. Ayrıca beyaz çürüme mantarı *Irpex lacteus* ve kahverengi çürüme mantarı *Serpula lacrymans* ile biyolojik dayanıklılık testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma

sonucunda borat tutunma oranındaki artışın, özellikle EPI ile yapıştırılan numunelerde kesme dayanımında azalmaya neden olduğu görülmüştür. Bu durum, borat işleminin yapıştırıcının ıslanabilirliği ve bağ oluşumu üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Buna karşın boratla işlem görmüş numuneler, işlem görmemiş CLT ve masif ahşap kontrol örneklerine kıyasla termitlere karşı daha yüksek direnç göstermiştir. Termal analizlerde %1 kütle kaybı esas alındığında bozunma sıcaklığı işlenmemiş ahşapta 265 °C, işlem görmüş numunelerde ise 270 °C olarak belirlenmiştir. Ayrıca poliüretan yapıştırıcı ile üretilen kontrol örneklerinin, EPI ile yapıştırılan örneklerle göre daha yüksek dayanım gösterdiği bildirilmiştir.

Mendes & ark., (2025: 193), ham çam reçinesi ile yerinde polimerizasyon yöntemi kullanılarak emprenye edilen CLT panellerin termit saldırısına karşı direnç performansını değerlendirmiştir. Çalışmada *Pinus elliottii* keresteleri kullanılmış, beş katmanlı CLT paneller EN 16351 standardına uygun olarak üretilmiş ve tek bileşenli poliüretan esaslı tutkal tercih edilmiştir. Emprenye çözeltisi, %80 çam reçinesi içeren alkollü çözelti şeklinde hazırlanmış ve seyreltici olarak %99 saflıkta etanol kullanılmıştır. Termit testleri, Acosta & ark., (2020: 3) tarafından tanımlanan tercihli besleme testi esas alınarak yapılmış, mekanik testlerde ise EN 408 standardı dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda çam reçinesi ile emprenye edilen CLT panellerin yoğunluğunda %66 oranında artış meydana geldiği belirlenmiştir. Bu artış, reçinenin odunun hücreler arası boşluklarını doldurması ve malzemeyi daha dirençli hale getirmesiyle açıklanmıştır. Termit saldırısı sonucunda emprenye edilmiş panellerde kütle kaybı %5 düzeyinde kalırken, emprenye edilmemiş panellerde bu oran %15 olarak belirlenmiştir. Başka bir ifadeyle, emprenye edilmemiş CLT paneller emprenye edilmiş panellere göre %200 daha fazla kütle kaybı göstermiştir. Mekanik özellikler açısından ise emprenye edilmiş panellerin termit

saldırısından sonra basınç ve çekme dayanımlarını koruduğu, buna karşılık emprenye edilmemiş panellerde özellikle çekme dayanımında %46'ya varan azalma meydana geldiği bildirilmiştir. Ayrıca emprenye edilmiş panellerde basınç altında rijitlikte %100, dayanımda ise %50 oranında artış tespit edilmiştir. Bu bulgular, çam reçinesi ile yapılan emprenye işleminin hem mekanik özelliklerin korunmasına hem de termit saldırılarına karşı direnç kazanılmasına katkı sağladığını göstermektedir.

Öztürk & ark., (2025a: 3), emprenye işlemi ve emprenye tipinin sarıçamdan üretilmiş CLT panellerin fiziksel, mekanik ve yapışma özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada C18 ve üzeri mukavemet sınıfına sahip sarıçam (*Pinus sylvestris L.*) keresteleri kullanılmış; bu keresteler Bakır Azol Tip C ve bor bazlı TarımBor formülasyonu ile vakum-basınç yöntemiyle emprenye edilmiştir. CLT üretiminde poliüretan tutkalı kullanılmış ve paneller 0,8 N/mm<sup>2</sup> basınç altında preslenmiştir. Kereste yüzeylerinin ıslanabilirliği temas açısı ölçümleriyle belirlenmiş; CLT panellerin eğilme dayanımı, elastikiyet modülü, kesme dayanımı, yoğunluk, su alma ve kalınlık şişmesi değerleri TS EN 408+A1 standardına göre test edilmiştir. Bulgulara göre koruyucu kimyasallar yoğunluk üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki oluşturmamış, ancak kalınlık şişmesi ve su alma değerlerinde farklılıklar meydana getirmiştir. Bakır Azol A grubu, kontrol grubuna göre kalınlık şişmesini azaltarak en dengeli boyutsal stabiliteyi sağlamıştır. Buna karşılık Tarım Bor gruplarında daha yüksek kalınlık şişmesi değerleri elde edilmiştir. Su alma değerleri tüm emprenye edilmiş örneklerde artış göstermiş, en yüksek değer Bakır Azol C grubunda belirlenmiştir. Temas açısı ölçümleri, koruyucu uygulamaların yüzey ıslanabilirliğini azalttığını ve yüzey serbest enerjisini düşürdüğünü göstermiştir. Mekanik açıdan değerlendirildiğinde ise tüm emprenye edilmiş grupların kontrol grubuna kıyasla daha düşük eğilme dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Genel olarak, Bakır Azol ve

Tarım Bor işlemlerinin CLT panellerin boyutsal stabilitesi, mekanik performansı ve arayüz davranışı üzerinde etkili olduğu; bu etkinin özellikle retansiyon düzeyine bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir. Orta düzeyde Bakır Azol retansiyonu en dengeli performansı sağlarken, yüksek retansiyon seviyeleri su alma, kalınlık şişmesi ve mekanik dayanım kayıplarıyla ilişkilendirilmiştir.

Ayanleye & ark., (2022: 107-108), sonradan emprenye edilmiş CLT panellerin performansını değerlendirmiştir. Çalışmada güney sarıçamı keresteleri, tek bileşenli poliüretan tutkalı ve astar kullanılarak üç ve beş tabakalı CLT paneller üretilmiştir. Emprenye işlemleri Bakır Azol Tip C (CA-C) ve Mikronize Bakır Azol (MCA) ile gerçekleştirilmiştir. Paneller, AWWA U1-18 standardında belirtilen UC4A kullanım sınıfı gerekliliklerini karşılayacak şekilde, tam hücre yöntemiyle 2,4 kg/m<sup>3</sup> hedef tutunma düzeyine kadar emprenye edilmiştir. Test numuneleri CLT panellerin farklı noktalarından alınmış ve toplamda 120 örnek elde edilmiştir. Çalışma sonucunda emprenye edilmiş CLT panellerde koruyucu madde penetrasyon oranının çoğunlukla %90'ın üzerinde olduğu belirlenmiştir. İncelenen numunelerin önemli bir kısmı, toprak teması veya tatlı su koşullarında kullanılan ahşap elemanlar için önerilen minimum tutunma değerine yakın veya bu değerin üzerinde sonuçlar vermiştir. Bu bulgular, yeterli düzeyde koruyucu madde tutunmasına sahip emprenye edilmiş CLT panellerin üretilebileceğini göstermektedir. Özellikle boyuna yönde üretilmiş CLT panellerde ve CA-C kullanımı durumunda hem üç hem de beş tabakalı panellerde yeterli bakır emprenyesi sağlanmıştır.

Demir & ark., (2025: 816), TarımBor ile emprenye edilmiş kerestelerden üretilen CLT panellerin altı ay süreyle toprakla temas koşullarındaki dayanıklılığı ve yıkanma davranışlarını incelemiştir. Çalışmada C18 ve üzeri mukavemet sınıfına sahip sarıçam keresteleri üç farklı retansiyon seviyesinde vakum-basınç yöntemiyle emprenye edilmiştir. Emprenye işleminden sonra 160

g/m<sup>2</sup> poliüretan tutkalı kullanılarak üç tabakalı CLT paneller üretilmiş ve paneller 0,8 N/mm<sup>2</sup> basınç altında preslenmiştir. Numunelerde yapışma direnci, elastikiyet modülü ve eğilme direnci test edilmiştir. Sonuçlara göre, özellikle toprak altında kalan numunelerde önemli miktarda yıkanma meydana gelmiştir. Bununla birlikte borla empenye edilmiş numunelerde biyolojik dayanıklılığın arttığı belirlenmiştir. Ancak bor tutulumunun artmasına bağlı olarak eğilme direnci ve elastikiyet modülünde azalma görülmüş, uzun süreli nem maruziyeti nedeniyle özellikle toprak altı örneklerde yapışma direncinde belirgin düşüşler meydana gelmiştir.

Quin & ark., (2025: 3775), ticari olarak üretilmiş üç katmanlı CLT panellerin Mikronize Bakır Azol (MCA) ile empenye edilmesinin yapışma dayanıklılığı, mukavemet ve yuvarlanma kayma özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada güney sarıçamı ve poliüretan tutkalı kullanılmıştır. Blok kesme dayanımı, ahşap kırılma yüzdesi, delaminasyon, yuvarlanma kayma dayanımı ve yuvarlanma kayma modülü değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre MCA ile empenye işlemi, blok kesme dayanımı ve ahşap kırılma yüzdesi üzerinde önemli bir olumsuz etki göstermemiştir. Benzer şekilde yuvarlanma kayma dayanımı ve yuvarlanma kayma modülü üzerinde de istatistiksel olarak anlamlı bir olumsuzluk tespit edilmemiştir. Hatta empenye edilmiş panellerde yuvarlanma kayma modülü 82,4 MPa, kontrol panellerinde ise 74,8 MPa olarak belirlenmiş ve yaklaşık %9,3 oranında artış görülmüştür. Bununla birlikte delaminasyon testlerinde hem kontrol hem de empenyeli CLT numunelerinde katman ayrılmaları gözlemlenmiştir. Çalışma, uygun parametrelerle uygulanan empenye işleminin bazı mekanik özellikleri koruyabileceğini, ancak bazı koşullarda yapışma performansını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

Lim & ark., (2020b: 1), mikronize bakır azol tip C (MCA-C) ile emprenye edilmiş CLT panellerde farklı yapıştırıcı türlerinin yapışma performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada güney sarıçamı keresteleri ile melamin formaldehit, rezorsinol formaldehit ve poliüretan tutkalları kullanılmıştır. MCA-C işlemi CLT panellere 1,0 ve 2,4 kg/m<sup>3</sup> olmak üzere iki farklı retansiyon seviyesinde uygulanmıştır. Yapışma performansı ASTM D905 ve ASTM D2559 standartlarına göre blok kesme ve delaminasyon testleriyle değerlendirilmiştir. Bulgulara göre blok kesme dayanımı ve ahşap kırılma yüzdesi hem retansiyon seviyesinden hem de yapıştırıcı türünden etkilenmiştir. 1,0 kg/m<sup>3</sup> retansiyon seviyesinin, yapıştırıcı türünden bağımsız olarak blok kesme dayanımını düşürdüğü; buna karşılık 2,4 kg/m<sup>3</sup> retansiyon seviyesinde rezorsinol formaldehit ve poliüretan tutkalları kullanıldığında kontrol örneklerine kıyasla önemli bir dayanım kaybı oluşmadığı belirlenmiştir. Ayrıca dış ortam uygulamaları açısından, MCA-C ile işlem görmüş malzemelerde poliüretan tutkalının daha üstün performans gösterdiği ifade edilmiştir.

Adeniran & ark., (2025: 3), iki farklı ağaç türünden üretilen CLT panellerde borat esaslı emprenye işlemlerinin yapışma performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada Douglas köknarı ve büyük köknar keresteleri ile poliüretan tutkalı kullanılmıştır. Emprenye işlemi daldırma, çift vakum ve basınç + vakum yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, borat esaslı emprenye işlemlerinin kimyasal tutulum, penetrasyon ve yapışma performansı üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Büyük köknar, daha yüksek geçirgenliği nedeniyle Douglas köknarına göre daha fazla bor tutunumu ve daha derin penetrasyon sağlamıştır. Uygulama yöntemleri arasında en etkili sonuçlar basınç + vakum işleminde elde edilirken, daldırma yöntemi daha yüzeysel kalmıştır. Yapışma performansı açısından büyük köknar tüm koşullarda standart gereklilikleri karşılarken, Douglas köknarında özellikle

planyalanmamış ve daldırma yöntemi uygulanmış örneklerde bağ dayanımı ve delaminasyon performansı olumsuz etkilenmiştir. Bu nedenle borat esaslı emprenye işlemlerinin CLT üretiminde biyolojik dayanıklılığı artırma potansiyeline sahip olduğu, ancak uygulama yöntemi, ağaç türü ve yüzey hazırlığına bağlı olarak yapışma performansını farklı şekillerde etkileyebileceği belirtilmiştir.

Adnan & ark., (2021: 285), alkali bakır kuaterner (ACQ) ile emprenye edilen dört farklı Malezya ağaç türünden üretilmiş CLT panellerin yüzey kalitesi ve yapışma performansını araştırmıştır. Çalışmada batai, sesenduk, kauçuk ağacı ve kedondong keresteleri kullanılmıştır. ACQ emprenye işlemi vakum-basınç yöntemiyle gerçekleştirilmiştir; bakır oksit miktarı atomik absorpsiyon spektrofotometresiyle, yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı ise ilgili ölçüm cihazlarıyla belirlenmiştir. ACQ işleminin her bir ağaç türünün yoğunluğunda belirgin artışa neden olduğu, özellikle düşük yoğunluklu batai türünün daha fazla koruyucu madde emdiği görülmüştür. İşlem, yüzey kimyasındaki değişimler ve yeniden kurutma etkileri nedeniyle yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. Bununla birlikte ACQ uygulaması, bazı türlerde ıslanabilirliği azaltmasına rağmen yapıştırıcının yüzeyde daha homojen yayılmasına katkı sağlamış ve daha etkin bir bağ oluşumunu desteklemiştir. ACQ işleminin CLT'nin blok kesme dayanımı üzerinde genel olarak anlamlı bir olumsuz etkisi olmadığı belirlenmiş; ayrıca tüm numunelerde gözle görülür delaminasyon tespit edilmemiştir. Bu bulgular, ACQ koruyucularının uygun yapışma performansı ve kesme dayanımı sağlayarak CLT panel üretiminde kullanılabileceğini ve farklı ağaç türlerinin birlikte değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur.

## **Sonuçlar**

Bu derleme çalışmasında, emprenye işlemlerinin çapraz lamine ahşap (CLT) panellerin teknolojik özellikleri üzerindeki

etkileri güncel literatür doğrultusunda değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, emprenye işlemlerinin CLT panellerin biyolojik dayanıklılığını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Özellikle bakır bazlı koruyucular, bor bileşikleri ve doğal reçine esaslı uygulamaların mantar, termit ve diğer biyolojik bozunduruculara karşı etkili koruma sağladığı; böylece CLT panellerin servis ömrünü uzatabildiği belirlenmiştir. Bunun yanında bazı çalışmalarda, emprenye işlemleri sayesinde dış ortam koşullarına karşı dayanıklılığın arttığı ve delaminasyon riskinin azaltılabildiği ifade edilmiştir.

Ancak literatürde yer alan bulgular, emprenye işlemlerinin yalnızca biyolojik dayanıklılığı değil, aynı zamanda CLT panellerin fiziksel, mekanik ve yapışma performansını da etkilediğini göstermektedir. Özellikle yüksek retansiyon seviyelerinde uygulanan koruyucu işlemlerin eğilme dayanımı, elastikiyet modülü ve yapışma direnci üzerinde olumsuz etkiler oluşturabildiği belirlenmiştir. Bunun temel nedeninin, emprenye maddelerinin odun hücre yapısını ve yüzey kimyasını değiştirerek yapıştırıcının ahşap yüzeyine nüfuzunu ve bağ oluşumunu etkilemesi olduğu düşünülmektedir. Buna karşın bazı araştırmalarda, uygun retansiyon seviyelerinde ve doğru yapıştırıcı sistemleriyle gerçekleştirilen emprenye uygulamalarının mekanik özellikler üzerinde önemli bir olumsuzluk oluşturmadan dayanıklılığı artırabildiği ortaya konmuştur.

Çalışmalarda ayrıca kullanılan yapıştırıcı türünün CLT performansı üzerinde belirleyici olduğu görülmektedir. Özellikle poliüretan (PUR) esaslı yapıştırıcıların, emprenye edilmiş CLT panellerde daha başarılı yapışma performansı sağladığı ve dış ortam koşullarına karşı daha dayanıklı sonuçlar verdiği dikkat çekmektedir. Bunun yanında ahşap türü, yüzey pürüzlülüğü, ıslanabilirlik, pres basıncı ve emprenye yöntemi gibi parametrelerin de yapışma performansını doğrudan etkilediği anlaşılmaktadır. Daldırma,

vakum-basınç ve püskürtme gibi farklı emprenye yöntemlerinin koruyucu madde penetrasyonu ve tutunması üzerinde farklı sonuçlar oluşturduğu; özellikle basınç destekli uygulamaların daha homojen koruma sağlayabildiği görülmektedir.

Literatürde dikkat çeken bir diğer konu ise doğal esaslı koruyucuların kullanımına yönelik artan ilgidir. Özellikle çam reçinesi gibi biyobazlı emprenye maddelerinin hem biyolojik dayanıklılığı artırdığı hem de bazı mekanik özellikleri koruyabildiği belirlenmiştir. Bu durum, çevre dostu ve sürdürülebilir koruyucu sistemlerin gelecekte daha fazla önem kazanabileceğini göstermektedir. Ayrıca nano kaplamalar ve hidrofobik yüzey modifikasyonları gibi yeni nesil yüzey işlemlerinin CLT panellerin dış ortam performansını geliştirme potansiyeline sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, emprenye işlemlerinin CLT panellerin kullanım ömrünü uzatma açısından önemli avantajlar sağladığı; ancak uygulama parametrelerinin dikkatli seçilmemesi durumunda mekanik performans ve yapışma özelliklerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle CLT üretiminde kullanılacak koruyucu kimyasalın türü, retansiyon seviyesi, uygulama yöntemi ve yapıştırıcı sistemi birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle yüksek retansiyon seviyelerinin neden olabileceği mekanik kayıpları azaltacak optimum işlem koşullarının belirlenmesi önem taşımaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, emprenye edilmiş CLT panellerin uzun süreli açık alan performanslarının farklı iklim koşullarında araştırılması önerilmektedir. Özellikle 12 ay ve üzeri saha maruziyet çalışmalarının gerçekleştirilmesi, CLT panellerin gerçek kullanım koşullarındaki davranışlarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Bunun yanında doğal ve çevre dostu emprenye maddeleri ile nano teknoloji destekli yüzey modifikasyonlarının CLT paneller üzerindeki etkilerinin daha

kapsamlı şekilde araştırılması, sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi açısından önemli görölmektedir. Ayrıca emprenye işlemleri ile yapıştırıcı sistemleri arasındaki etkileşimlerin mikroyapısal düzeyde incelenmesi, gelecekte daha dayanıklı ve yüksek performanslı CLT panellerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

## Kaynakça

Abed, J., Rayburg, S., Rodwell, J., & Neave, M. (2022). A review of the performance and benefits of mass timber as an alternative to concrete and steel for improving the sustainability of structures. *Sustainability*, *14*(9),5570. Doi: 10.3390/su14095570

Acosta, A. P., Labidi, J., Barbosa, K. T., Cruz, N., Delucis, R. D. A., & Gatto, D. A. (2020). Termite resistance of a fast-growing pine wood treated by in situ polymerization of three different precursors. *Forests*, *11*(8), 865. Doi: 10.3390/f11080865

Adeniran, A. T., Englund, K., Li, H., & Kim, J. (2025). Influence of borate chemical treatment on adhesive bond performance of Douglas fir and grand fir laminates. *European Journal of Wood and Wood Products*, *83*(2), 58. Doi: 10.1007/s00107-025-02218-y

Adnan, N. A., Md Tahir, P., Husain, H., Lee, S. H., Anwar Uyup, M. K., Mat Arip, M. N., & Ashaari, Z. (2021). Effect of ACQ treatment on surface quality and bonding performance of four Malaysian hardwoods and cross laminated timber (CLT). *European Journal of Wood and Wood Products*, *79*(2), 285-299. Doi: 10.1007/s00107-020-01609-7

ANSI/APA PRG 320-2012 (2019). “Standard for performance-rated cross-laminated timber,” American National Standards Institute, Washington, D.C., USA.

ASTM, A. (2013). D905-08, Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. ASTM International.

AWPA P48-15, Standard for Copper Azole Type C (CA-C), American Wood Protection Association, Birmingham, AL (2017).

AWPA P61-16, Standard for Micronized Copper Azole (MCA), American Wood Protection Association, Birmingham, AL (2017).

AWPA U1-18 (2018). Use Category System: User Specification for Treated Wood, American Wood Protection Association, Birmingham, AL.

Ayanleye, S., Quin, F., Zhang, X., Lim, H., & Shmulsky, R. (2023). Preservatives penetration and retention in post-treated cross-laminated timber panels with different layup and thickness. *Journal of Building Engineering*, 67, 106009. Doi: 10.1016/j.jobe.2023.106009

Ayanleye, S., Quin, F., Zhang, X., Nicholas, D., Shmulsky, R., & Lim, H. (2022). Development of Preservative-Treated Cross-Laminated Timber: Effects of Panel Layup and Thickness on Preservative Penetration and Retention.

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. Doi: 10.1186/s10086-022-02041-6

Baldan, A. (2012). Adhesion phenomena in bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 38, 95-116. Doi: 10.1016/j.ijadhadh.2012.04.007

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. (2013). Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. In *Focus solid*

*timber solutions-European conference on cross laminated timber (CLT)* (pp. 3-36). University of Bath.

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

Cappellazzi, J., Konkler, M. J., Sinha, A., & Morrell, J. J. (2020). Potential for decay in mass timber elements: A review of the risks and identifying possible solutions. *Wood Material Science & Engineering*, 15(6),351-360. Doi: 10.1080/17480272.2020.1720804

Çolak, S., Çolakoğlu, G., & Aydın, I. (2007). Effects of logs steaming, veneer drying and aging on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL). *Building and Environment*, 42(1), 93-98. Doi: 10.1016/j.buildenv.2005.08.008

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

Frihart, C. R., & Hunt, C. G. (2010). Adhesives with wood materials: bond formation and performance. *Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 10*. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 10.1-10.24., 190, 10-1.

Hovanec D. Effect of wood characteristics on adhesive bond quality of yellowpoplar for use in cross laminated timbers. [Master of Science dissertation]. West Virginia: Davis College of Agriculture, Natural Resources and Design 2015:90.

Jerves, R., Yadama, V., Aro, M., & Pelaez-Samaniego, M. R. (2023). Cross-laminated strand veneer lumber mass timber panels from thermally modified strands. *Construction and Building Materials*, 368, 130370. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130370

Kamke, F. A., & Lee, J. N. (2007). Adhesive penetration in wood—a review. *Wood and Fiber Science*, 205-220.

Karliati, T., Febrianto, F., Syafii, W., Wahyudi, I., & Sumardi, I. (2019). Properties of Laminated Wood Bonded with Modified Gutta-Percha Adhesive at Various Surface Roughness Profile of Laminae. *BioResources*, 14(4).

Lebow, S. T. (2010). Wood preservation. Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 15. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 15.1-15.28., 190, 15-1.

Li, S., & Hadigheh, S. A. (2025). Enhancing the load-slip behaviour of cross-laminated timber-concrete composite using FRP connections: Experimental and numerical investigation. *Engineering Structures*, 336, 120479. Doi: 10.1016/j.engstruct.2025.120479

Lim, H., Tripathi, S., & Li, M., (2020a). Rolling shear modulus and strength of cross-laminated timber treated with micronized copper azole type C (MCA-C). *Construction and Building Materials*, 259, 120419. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120419

Lim, H., Tripathi, S., & Tang, J. D. (2020b). Bonding performance of adhesive systems for cross-laminated timber treated with micronized copper azole type C (MCA-C). *Construction and Building Materials*, 232, 117208. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117208

Lisperguer, J. H., & Becker, P. H. (2005). Strength and durability of phenol-resorcinol-formaldehyde bonds to CCA-treated radiata pine wood. *Forest products journal*, 55(12).

Lorenz, L. F., & Frihart, C. (2006). Adhesive bonding of wood treated with ACQ and copper azole preservatives. *Forest products journal*. Vol. 56, no. 9 (Sept. 2006): p. 90-93.

Malanit, P., Barbu, M. C., & Frühwald, A. (2009). The gluability and bonding quality of an asian bamboo (" dendrocalamus asper") for the production of composite lumber. *Journal of Tropical Forest Science*, 361-368.

Mendes, R. A. B., Acosta, A. P., Barbosa, K. T., Gatto, D. A., & de Avila Delucis, R. (2025). Termite resistance of a pine wood-based cross-laminated timber impregnated treated with raw pine resin. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 22(1), 190-197. Doi: 10.1007/s13196-025-00372-7

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(1), 1-11. Doi: 10.1186/s10086-019-1799-z

Öztürk, H., Demir, A., Birinci, A. U., İlhan, O., Çakmak, A., Demirkir, C., & Gezer, E. D. (2025a). Impact of preservative impregnation on wettability, surface free energy, and adhesive bonding of Scots pine CLT. *The Journal of Adhesion*, 1-24. Doi: 0.1080/00218464.2025.2589298

Öztürk, H., Demir, A., Birinci, A. U., İlhan, O., Demirkir, C., & Gezer, E. D. (2025b). 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

Quin Jr, F., Ayanleye, S., França, T. S., Shmulsky, R., & Lim, H. (2024). Bonding performance of preservative-treated cross-laminated timber (CLT) posttreated with CU-based preservatives. *Forest Products Journal*, 73(4), 326-338. Doi: 10.13073/FPJ-D-23-00031

Quin Jr, F., Franca, T., Undadi, H., Shmulsky, R., Franca, F., & Henfield, B. (2025). Bonding durability and rolling shear strength of commercially produced southern yellow pine cross-laminated timber treated with micronized copper azole (MCA). *BioResources*, 20(2), 377. Doi: 10.15376/biores.20.2.3773-3787

Ren, X., Shen, Y., Gao, Y., Zhang, D., & Chang, J. (2019). Optimization of bonding parameters of laminated wood using a novel bio-based RPF adhesive. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 275, p. 01025). EDP Sciences. Doi: 10.1051/mateconf/201927501025

Sharifnia, H., & Hindman, D. P. (2017). "Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of southern yellow pine cross laminated timbers," *Construction and Building Materials* 156, 314-320. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.122.

Siddika, A., Al Mamun, M. A., Aslani, F., Zhuge, Y., Alyousef, R., & Hajimohammadi, A. (2021). Cross-laminated timber–concrete composite structural floor system: A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis*, 130, 105766. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105766

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: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145

Stoeckel, F., Konnerth, J., & Gindl-Altmutter, W. (2013). Mechanical properties of adhesives for bonding wood—A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 45, 32-41. Doi: 10.1016/j.ijadhadh.2013.03.013

Syahirah, Y. A., Anwar, U. M. K., Sh, L., Ong, C. B., Asniza, M., & Paridah, M. T. (2025). The properties of Cross Laminated Timber (CLT): a review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 138, 103924. Doi: 10.1016/j.ijadhadh.2024.103924

Taylor, A., Denavit, M., Lloyd, J., Kim, J. W., Kirker, G., & Mankowski, M. (2023). Borate treatment of CLT panels using vacuum: A proof of concept. *Forest Products Journal*, 73(1), 24-30. Doi: 10.13073/FPJ-D-22-00060

Udele, K. E., Morrell, J. J., Cappellazzi, J., & Sinha, A. (2023). Characterizing properties of fungal-decayed cross laminated timber (CLT) connection assemblies. *Construction and Building Materials*, 409, 134080. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134080

Viana, G. M. S. O., Costa, M., Banea, M. D., & da Silva, L. F. (2017). A review on the temperature and moisture degradation of adhesive joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 231(5), 488-501. Doi: 10.1177/1464420716671503

Wainscott, C., Konkler, M., Noble, S., Valenti, J., Morrell, J., & Presley, G. (2024). Characterization of bondlines in cross-laminated timber made with preservative-treated lumber. *Wood and Fiber Science*, 56(4). Doi: 10.22382/wfs-2024-17

Wang, J. Y., Stirling, R., Morris, P. I., Taylor, A., Lloyd, J., Kirker, G., ... & Mankowski, M. E. (2018). Durability of mass timber

structures: A review of the biological risks. *Journal: Wood and Fiber Science*, 50, 110-127.

Yörür, H. (2018). Investigation of factors influencing on wood adhesion capability. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 18(1), 99-107. Doi: 10.17475/kastorman.409206

## BÖLÜM 2

# ÇAPRAZ LAMİNE AHŞAP (CLT) PANELLERDE YANGIN GECİKTİRİCİ UYGULAMALARIN PERFORMANS ÜZERİNE ETKİLERİ

OKAN İLHAN<sup>1</sup>  
ABDULLAH UĞUR BİRİNCİ<sup>2</sup>  
AYDIN DEMİR<sup>3</sup>

### Giriş

İklim değışikliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yapı sektöründe yenilikçi ve çevre dostu malzemelere yönelim giderek artmaktadır. Bu bağlamda, ahşap esaslı yapı malzemeleri hem estetik değerleri hem de düşük karbon ayak izi gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Çapraz lamine ahşap (Cross Laminated Timber – CLT), çok katmanlı yapısı sayesinde hem yüksek taşıma kapasitesi hem de boyutsal stabilite sağlayan modern

---

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Araştırma Görevlisi Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Odun Mekaniği ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0003-3273-3615

<sup>3</sup> Doçent Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Odun Mekaniği ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0003-4060-2578

bir mühendislik ürünü olarak günümüzde beton ve elik gibi geleneksel yapı malzemelerine alternatif olarak kullanılmaktadır (Gagnon & Pirvu, 2011: 1).

CLT paneller, genellikle üç veya daha fazla ahşap katmanın lif yönleri birbirine dik olacak şekilde yaptırılmasıyla üretilir. Bu retim tekniği, malzemenin eğilme, kesme ve burulma gibi mekanik yükler karşısında daha dayanıklı hale gelmesini sağlar. Ayrıca, fabrika ortamında n üretim yapılabilmesi sayesinde inşaat sresinde önemli lde azalma sağlanırken işçilik maliyetleri de düşmektedir (Brandner & ark., 2016: 331). Bu zellikleriyle CLT, çok katlı konutlar, okullar, ticari yapılar ve köprüler gibi çeşitli yapı tiplerinde kullanılmaya balanmtır. CLT panellerin yapısal performansı üzerine yapılan bilimsel çalışmalar, bu malzemenin farklı uygulamalardaki dayanıklılığını ve verimliliğini ortaya koymaktadır. Örneğin, tam ölçekli iki katlı bir CLT ev modeli üzerinde yapılan deneysel çalışmada, yapının yatay yükler altındaki performansı değerlendirilmiş ve CLT panellerin bağlantı elemanlarıyla birlikte yüksek dayanım ve deformasyon kapasitesi sergilediği belirlenmiştir (Popovski & Gavric, 2015: 11). Ayrıca, CLT panellerin sıkıştırma dayanımı üzerine yapılan bir çalışmada, lamina sayısının artmasının panelin genel sıkıştırma dayanımını olumlu etkilediği ve bu etkinin Monte Carlo simülasyonlarıyla da doğrulandığı gösterilmiştir (Oh & ark., 2015: 33). Bunun yanı sıra, CLT panellerin hibrit yapılarla entegrasyonu da aratırılmtır; rneğin, CLT-elik kompozit döşeme modüllerinin eğilme testleri ve sayısal modellemeleri, bu yapıların yüksek taşıma kapasitesi ve rijitlik sunduğunu ortaya koymuştur (Owolabi & Loss, 2023: 1). Ayrıca, CLT köprü demelerinin ağır taşıt yükleri altındaki davranışı incelenmiş ve bu yapıların yorgunluk dayanımının yüksek olduğu, 500.000 yükleme döngüsü sonrasında bile belirgin bir rijitlik kaybı veya hasar gözlemlenmediği raporlanmtır (Lindersson & ark., 2025: 1317). Bu alımalar, CLT panellerin çeşitli yapısal

uygulamalarda güvenilir ve sürdürülebilir bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, CLT panellerin yangın güvenliği, bu malzemenin yaygın kullanımının önündeki önemli mühendislik sorunlarından biridir. Ahşap malzemelerin doğası gereği yanıcı olması, yapı güvenliği açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken bir durumdur. Fin yangın yönetmeliği uyarınca, perde duvar gibi ana strüktürel elemanlar ve döşeme gibi ikincil strüktürel elemanlar, yangına 90 dakika dayanımlı olarak tasarlanmalıdır (İlgin & Yücel, 2023: 85). Özellikle çok katlı yapılarda, yangın esnasında yapısal stabilitenin korunması, panik ortamının azaltılması ve tahliye sürelerinin uzatılmaması adına CLT panellerin yangın performansının artırılması gerekmektedir (Frangi & ark., 2009: 1078).

Ahşap, ısıya maruz kaldığında önce kurur, ardından piroliz sürecine girerek uçucu organik bileşenler açığa çıkarır. Bu süreç, alev oluşumunun başlaması ve yanmanın devam etmesine yol açar. Ancak CLT panellerde yüzeyde oluşan karbonlaşma (charring) tabakası, alt katmanların oksijenle temasını engelleyerek yangının ilerlemesini yavaşlatabilir (Östman & ark., 2010). Bu, belirli bir süre boyunca yapının yangına dayanıklılığını sürdürebilmesini sağlar. Ancak bazı durumlarda, özellikle yapıştırıcı kalitesi düşükse, yüksek sıcaklık etkisiyle panel katmanları arasında delaminasyon (katman ayrılması) meydana gelebilir ve bu durum yangının ilerlemesini hızlandırabilir (Brandner & ark., 2016: 336).

Bu risklerin azaltılması amacıyla CLT panellere çeşitli yangın geciktirici kimyasallar uygulanmaktadır. Bu maddeler, genellikle ahşabın alev alma süresini geciktiren, duman üretimini azaltan veya yangın esnasında koruyucu bir tabaka oluşturarak yapısal dayanımı artıran özelliklere sahiptir. Ancak bu kimyasalların etkinliği, çevresel etkileri, uygulama yöntemleri ve CLT panelin

mekanik özellikleri üzerindeki potansiyel olumsuz etkileri gibi konular detaylı değerlendirme gerektirir.

Bu çalışma kapsamında, CLT panellerin yapısal özellikleri ve yangın davranışları incelenerek, yangın güvenliğini artırmak amacıyla kullanılan yanmayı geciktirici kimyasalların türleri, uygulama yöntemleri ve etki mekanizmaları literatür desteğiyle ortaya konulacaktır. Ayrıca uluslararası yangın test standartları, deneysel bulgular ve sürdürülebilirlik kriterleri bağlamında bu kimyasalların yapı sektöründeki kullanımını değerlendirilecektir.

### **CLT Panellerin Yapısal Özellikleri**

Çapraz lamine ahşap (CLT) panellerin yapısal performansına yönelik yapılan araştırmalar, bu malzemenin çok katmanlı yapısından kaynaklanan mekanik avantajlarını ortaya koymuştur. Özellikle panelin taşıyıcılığı, rijitliği ve boyutsal stabilitesi, lif yönlerinin her katmanda dik yerleştirilmesiyle önemli ölçüde artmaktadır. Brandner & ark., (2016: 347) çalışmaları, CLT panellerin iki eksenli taşıma kapasitesine sahip olduğunu ve bu özelliğin, çok katlı yapılarda betonarmeye alternatif oluşturabilecek düzeye ulaştığını göstermektedir. Ayrıca, üretim sürecinde kullanılan yapıştırıcıların türü ve presleme parametreleri gibi teknolojik faktörlerin, panelin genel mukavemeti ve çevresel dayanımı üzerinde belirleyici rol oynadığı tespit edilmiştir. Ceccotti (2008: 156), CLT yapıların geleneksel betonarme sistemlere kıyasla %30 ila %50 oranında daha hafif olduğunu ve bunun özellikle deprem etkilerinin azaltılmasında önemli avantaj sağladığını vurgulamaktadır.

CLT panellerin yangın davranışına yönelik yapılan çalışmalar ise bu yapı elemanlarının yangın anındaki performansını belirleyen temel unsurlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Özellikle karbonlaşma tabakasının alt katmanları ısıdan koruyucu bir bariyer işlevi gördüğü, ancak bu sürecin malzemenin kesitini daraltarak

taşıyıcılığı azalttığı belirtilmiştir (Östman & ark., 2010). Frangi & ark., (2009: 1079), karbonlaşma hızının ortalama 0.6–0.8 mm/dk arasında değiştiğini ve yangın dayanım süresinin panel kalınlığına ve yapıştırıcı tipine bağlı olduğunu göstermiştir. Yangın sırasında yaşanan delaminasyon olgusu, özellikle düşük ısı direncine sahip yapıştırıcılarla üretilen panellerde, yangının ilerlemesini hızlandırmakta ve yapının ani çökme riskini artırmaktadır. Bu bağlamda, PRF gibi termo-dirençli yapıştırıcıların kullanımının yangın güvenliği açısından kritik olduğu ifade edilmektedir (König & Walleij, 2000). Yangın dayanımını artırmaya yönelik yapılan çalışmalar arasında kaplama malzemeleri ve yangın geciktirici kimyasalların kullanımı da yer almakta, ancak bu müdahalelerin yapısal bütünlüğe etkisi mühendislik açısından dikkatle değerlendirilmektedir. CLT paneller, modern mühendislik uygulamalarında kullanılan çok katmanlı, yüksek performanslı yapı elemanlarıdır. CLT panellerin yapısal özellikleri hem üretim sürecinden hem de kullanılan malzemenin doğal ve teknolojik niteliklerinden etkilenir. Bu paneller, genellikle inşaat sektöründe duvar, döşeme, çatı ve merdiven gibi taşıyıcı elemanlar olarak görev alırlar.

CLT üretiminde, genellikle üç ile yedi kat arasında değişen ahşap lameller (keresteler), her katmanda lif yönleri birbirine dik gelecek şekilde yerleştirilir. Bu çapraz yerleşim sayesinde panelin boyutsal stabilitesi artırılır, ani eğilme ve burulma davranışları sınırlandırılır. Bu özellik, özellikle betonarme sistemlere alternatif olarak tercih edilen çok katlı ahşap yapılarda yapının rijitliğini korumada büyük avantaj sağlar (Schickhofer & ark., 2010).

Yapısal olarak, CLT panellerin taşıma kapasitesi ve mukavemeti; panelin toplam kalınlığı, katman sayısı, kullanılan ahşap türü (çoğunlukla ladin veya çam), yapıştırıcı tipi ve presleme parametreleri gibi faktörlere bağlıdır. Lif yönlerinin değişimli yerleşimi, iki eksenli taşıma özelliği kazandırarak CLT panellerin

hem dik hem yatay yükler altında başarılı performans göstermesini sağlar (Brandner & ark., 2016: 342). Ayrıca panellerin üretiminde kullanılan endüstriyel yapıştırıcılar (örneğin poliüretan, melamin-üre-formaldehit ve fenol-rezorsinol-formaldehit) panelin nem dayanımı ve sıcaklık etkilerine karşı mukavemetini de doğrudan etkiler. CLT panellerin bir diğer yapısal avantajı da yüksek yük taşıma kapasitelerinin yanı sıra nispeten hafif olmalarıdır. Bu, taşıyıcı sistemlerin daha az temele yük aktarmasını sağlar ve deprem gibi yatay kuvvet etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunur. Örneğin, tipik bir 5 katlı betonarme binaya kıyasla, eşdeğer büyüklükteki bir CLT yapısı %30 ila %50 daha hafiftir (Ceccotti, 2008). Bu durum, özellikle zayıf zemin koşullarına sahip bölgelerde CLT kullanımını cazip kılar.

CLT paneller, ön üretim süreçlerine yüksek düzeyde uyum sağlayan yapı elemanları arasında yer almaktadır. Panellerin fabrika ortamında proje ölçülerine uygun biçimde kesilmesi; pencere, kapı ve tesisat boşluklarının önceden oluşturulması, şantiye sahasındaki montaj süresini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum, işçilik maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlarken aynı zamanda iş güvenliği koşullarının iyileştirilmesine de olanak tanımaktadır. Ayrıca CNC kontrollü üretim teknolojilerinin kullanılması, panel boyutlarında yüksek hassasiyet elde edilmesini sağlayarak yapı elemanlarının birbirleriyle tam uyumlu şekilde monte edilmesini mümkün kılmaktadır (Mohammad & ark., 2012).

Bununla birlikte, CLT panellerin yapısal performansı bazı sınırlılıklar da içermektedir. Özellikle katmanlar arasındaki yapıştırma kalitesinin yetersiz olduğu üretimlerde, uzun süreli yük etkileri altında tabakalar arasında ayrılma (delaminasyon) problemleri ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca yüksek nem içeriği; mantar oluşumu, böceklenme ve biyolojik çürüme gibi bozulmalara zemin hazırlayabilmektedir. Bu nedenle CLT panellerin kullanım öncesinde uygun kurutma işlemlerinden geçirilmesi, emprenye

edilmesi ve yangın geciktirici uygulamalarla korunması önerilmektedir (EN 16351, 2021).

### **CLT'nin Yangın Performansı**

Yangın ortamında sıcaklık aniden yükselir. Sıcaklık ilk 5 dakikada 555 °C'ye yükselir. 10 dakika sonra 660 °C'ye, 15 dakika sonra 720 °C' 30 dakika sonra 820 °C'ye, 60 dakika sonra ise 927 °C'ye yükselmektedir (Gümüştas, 2021: 23). Çapraz lamine ahşap (CLT) panellerin yangın altındaki davranışı, yapı güvenliği açısından belirleyici unsurlardan biridir. Ahşap malzemeler doğal olarak yanıcı oldukları için, CLT gibi mühendislik ürünü ahşap elemanların yangın anındaki performansları hem malzemenin doğasına hem de üretim tekniklerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Ancak CLT'nin çok katmanlı yapısı, yangın anında oluşan karbonlaşma tabakası sayesinde belirli ölçüde koruyucu bir bariyer işlevi görebilir. Ahşap, ısıya maruz kaldığında önce kurur ve ardından piroliz sürecine girer. Bu süreçte hücre yapılarındaki selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi organik bileşenler bozulmaya uğrayarak yanıcı gazlar ve katran üretir. Alevle temas ettiğinde bu gazlar tutuşarak ahşabın yanmasına neden olur. Ancak CLT panellerde dış katmanlar karbonlaşarak (charring) koruyucu bir tabaka oluşturur; bu tabaka ısı transferini yavaşlatarak alt katmanların daha geç yanmasını sağlar (Östman & ark., 2010).

CLT'nin yangın dayanımı, öncelikle karbonlaşma hızına bağlıdır. Bu hız, tipik olarak 0.6–0.8 mm/dk arasında değişmekte olup, panelin türüne, lif yönüne ve ortam koşullarına göre farklılık gösterebilir (Frangi & ark., 2009: 1079; Hasburgh & ark., 2016: 6). Ancak karbonlaşma, malzemenin kesitini küçülterek taşıyıcı kesit alanını azaltır. Bu nedenle belirli bir süreden sonra panelin yapısal kapasitesi zayıflayabilir. Bir diğer önemli yangın davranışı özelliği delaminasyon (katman ayrılması) olgusudur. Yüksek sıcaklık altında, paneller arasında kullanılan yapıştırıcılar bozulmaya

uğrayabilir. Bu durum, karbonlaşmış dış katmanın koparak düşmesine ve alt katmanların aniden yangına maruz kalmasına neden olabilir. Böylece yangının ilerlemesi hızlanır ve taşıyıcı sistemin ani çökme riski artar (Brandner & ark., 2016: 342). Bu nedenle CLT panellerde kullanılan yapıştırıcı türü, yangın dayanımı üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynar. Örneğin, poliüretan bazlı yapıştırıcılar, yüksek sıcaklıklarda erken ayrışma eğilimindeyken; fenol-rezorsinol-formaldehit (PRF) gibi termo-dirençli yapıştırıcılar bu riski azaltabilir (Zelinka & ark., 2018: 1; König & Walleij, 2000). Ayrıca yangın esnasında CLT panellerin yüzey sıcaklıkları, panelin kalınlığına ve ortamın oksijen seviyesine göre değişebilir. Yangın testlerinde genellikle panel yüzeyinin 300 °C civarında karbonlaşmaya başladığı ve 500 °C civarında tamamen yanıcı hale geldiği tespit edilmiştir. Bu süreçte hem ısı yayılımı hem de duman üretimi yapı içindeki tahliye güvenliği açısından risk oluşturur.

CLT'nin yangın performansının belirlenmesinde kullanılan temel yöntemlerden biri standart yangın testleridir. ISO 834, ASTM E119 ve EN 1365-1 gibi uluslararası standartlara göre yapılan testlerde, CLT panellerin yangına dayanıklılık süreleri belirlenir. Bu testlerde hem taşıyıcı kapasite (R), hem bütünlük (E) hem de yalıtım (I) kriterlerine göre derecelendirme yapılır. Örneğin, 5 katmanlı bir CLT panelin yaklaşık 60–90 dakika boyunca taşıyıcılığını koruduğu tespit edilmiştir (Frangi & ark., 2009: 1082). Yangın davranışını iyileştirmek amacıyla CLT panellere kaplama malzemeleri veya yanmayı geciktirici kimyasallar uygulanabilir. Ancak bu müdahaleler yapısal özellikleri değiştirebileceğinden, mühendislik tasarımı sırasında dikkate alınmalıdır.

Çapraz lamine ahşap (CLT) panellerin yangın performansı, yapı güvenliği açısından kritik bir parametre olup bu performans, çeşitli standart test yöntemleriyle belirlenmektedir. Yangına maruz kalan CLT panellerin taşıyıcılık (R), bütünlük (E) ve yalıtım (I) özelliklerini ne kadar süreyle koruyabildiği; ISO 834, EN 1365-1 ve

ASTM E119 gibi uluslararası standartlara göre yapılan yangın dayanımı testleriyle değerlendirilmektedir (Frangi & ark., 2008: 1280). Ayrıca malzemenin alev alma süresi, ısı yayımı ve duman oluşumu gibi yangına tepkisel davranışları da ISO 5660, ASTM E84 ve EN ISO 11925-2 gibi reaksiyon testleri aracılığıyla ölçülmektedir (Östman & ark., 2010). Bu test sonuçları, mühendislik tasarımlarında doğrudan kullanılarak yapıların yangın güvenliği düzeyinin belirlenmesine katkı sağlar (König & Walleij, 2000).

CLT panellerin yangına karşı dirençlerinin artırılması amacıyla yangın geciktirici kimyasalların kullanımı önemli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Amonyum polifosfat, bor bileşikleri, melamin fosfat gibi kimyasallar; yangın sırasında ısı yayılımını azaltmakta, endotermik reaksiyonlarla sıcaklık artışını yavaşlatmakta ve karbonlaşma tabakası oluşturarak yangının yayılmasını geciktirmektedir (LeVan & Winandy, 1990; Alongi & ark., 2015). Bu kimyasalların uygulanma yöntemi –özellikle vakum-basınç emprenye veya intümesan yüzey kaplamaları– CLT panellerin hem yangın performansını hem de mekanik ve estetik özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca çevresel sürdürülebilirlik açısından, halojen içermeyen ve biyolojik bazlı fosfor bileşikleri gibi çevre dostu geciktiriciler; toksik gaz üretimini azaltarak daha güvenli ve ekolojik alternatifler sunmaktadır (Weil & Levchik, 2009; Song & ark., 2014; Nordtreat, 2023).

### **Yangın Performansı Test Metotları**

Çapraz lamine ahşap (CLT) panellerin yangın performansının belirlenmesi, yapı güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. CLT gibi çok katmanlı ahşap yapı elemanlarının yangın sırasında taşıyıcılığını, bütünlüğünü ve yalıtım özelliklerini ne kadar süreyle koruyabildiği, uluslararası standartlara göre yapılan testlerle belirlenir. Bu testler, yangın sırasında malzemenin nasıl tepki verdiğini gözlemleyerek mühendislik hesaplamalarında ve

yönetmeliklerde güvenilir veri sağlamayı amaçlar. CLT panellerin yangın performansının değerlendirilmesinde kullanılan temel test metodları, genellikle standart yangın testleri ve reaksiyon testleri olmak üzere iki ana grupta toplanabilir:

### 1. Standart Yangın Testleri:

Bu testler, bir yapı elemanının belirli bir yangın eğrisine maruz kaldığında taşıyıcı özelliğini (R), bütünlüğünü (E) ve ısı yalıtımını (I) ne kadar süreyle koruyabildiğini belirlemek amacıyla yapılır. Yaygın olarak kullanılan standart testler şunlardır: ISO 834: Uluslararası ölçekte kabul gören standart yangın eğrisine göre sıcaklığın zamana bağlı olarak artışını belirler. Test süresince numune fırın ortamında kontrollü olarak ısıtılır. EN 1365-1: Taşıyıcı duvar ve döşeme elemanlarının yangına dayanıklılığını belirlemek için Avrupa Birliği'nde uygulanan test standardıdır. ASTM E119: Amerika'da yaygın olarak kullanılan, yangına dayanıklılık sürelerinin belirlenmesinde esas alınan standarttır. Yük altında test edilen yapı elemanlarının yangın koşullarına tepkisi ölçülür. Bu testlerde CLT paneller, hem dikey (duvar) hem yatay (döşeme) yönlerde test edilir. Numunelere genellikle gerçek yapısal yükler uygulanarak yangın sırasında taşıyıcılık performansları ölçülür. Süreç boyunca panel yüzey sıcaklıkları, iç sıcaklık artışı ve karbonlaşma derinlikleri izlenir (Frangi & ark., 2008: 1289).

### 2. Reaksiyon Testleri:

CLT panellerin yangınla karşılaştıklarında nasıl tepki verdiklerini belirlemek amacıyla yapılan testlerdir. Bu testler, genellikle malzemenin alev alma süresi, ısı yayma oranı, duman üretimi ve alev yayılımı gibi parametreleri ölçer. ASTM E84 / UL 723 (Steiner Tünel Testi): Alev yayılım indeksi (FSI) ve duman gelişim indeksi (SDI) belirlenerek yapı malzemelerinin yangın derecelendirmesi yapılır. ISO 5660 (Cone Calorimeter): Küçük örnekler üzerinde yapılan bu testte malzemenin ısı yayımı, tutuşma

zamanı, duman üretimi ve karbon monoksit salınımı gibi değerleri ölçülür. EN ISO 11925-2: Avrupa Yangın Sınıflandırma Sistemi (Euroclass) kapsamında alev yayılmasına karşı kısa süreli tepki testidir. Bu testlerden elde edilen sonuçlara göre CLT paneller genellikle Euroclass C veya D sınıfında değerlendirilir. Yangın geciktirici kimyasalların veya kaplamaların uygulanmasıyla Euroclass B seviyesine ulaşmaları mümkündür (Östman & ark., 2010).

### **Yangın Testleri Sonuçlarının Yapısal Tasarıma Uyarlanması**

Yangın test sonuçları, mühendislik tasarımlarında doğrudan kullanılmaktadır. Örneğin, belirli bir CLT panelin 60 dakika yangına dayanıklı olduğu testle belgelenmişse, bu veri yapı ruhsatı, yangın yönetmeliği ve sigorta düzenlemelerinde referans olarak kabul edilir. Yangına dayanıklılık hesaplarında genellikle karbonlaşma hızı, etkin kesit kalınlığı ve yük taşıma kapasitesi gibi veriler kullanılır (König & Walleij, 2000). Ayrıca test sonuçları, yangın sırasında panelin nasıl davranacağını modellenmesine olanak tanır. Böylece simülasyon destekli tasarım süreçlerinde, tahliye süreleri ve yapısal bütünlük senaryoları daha doğru biçimde planlanabilir.

### **Yangın Geciktirici Kimyasalların Sınıflandırılması**

CLT panellerde kullanılan yanmayı geciktiriciler temel olarak iki ana gruba ayrılır:

1. İnorganik Bazlı Geciktiriciler: Bu grup, kimyasal olarak ahşabın pirolizini ve yanıcı gazların oluşumunu baskılar. En yaygın olanları:
  - Bor Bileşikleri (Boraks ve Borik Asit)
  - Monoamonyum Fosfat (MAP)
  - Amonyum Polifosfat (APP)
  - Alüminyum Hidroksit  $Al(OH)_3$

Bu maddeler, ısıya maruz kaldığında endotermik tepkimelere girerek hem sıcaklık artışını yavaşlatır hem de ahşabın karbonlaşma eğilimini artırarak yangının yayılmasını engeller (LeVan & Winandy, 1990).

2. Organik Fosfor ve Azot İçeren Geciktiriciler: Termal bozunma sürecinde serbest radikal reaksiyonlarını baskılayarak yangının başlamasını ve yayılmasını önler. Ayrıca ısıya dayanıklı koruyucu bir kabuk oluşturarak panel yüzeyini izole eder. Örneğin:

- Trietil Fosfat
- Melamin Fosfat
- Tripotasyum Sitrat

Bazı organik katkıları, intümesan (şişerek koruyucu köpük oluşturan) özellik göstererek, panel yüzeyinde ısıya karşı yalıtıcı bir bariyer meydana getirir (Alongi & ark., 2015).

## **Yangın Geciktirici Kimyasalların Kullanımı, Uygulama Yöntemleri ve Etki Mekanizmaları**

Çapraz lamine ahşap (CLT) panellerin yangın performansını iyileştirmek amacıyla geliştirilen en önemli yöntemlerden biri, yanmayı geciktirici kimyasalların uygulanmasıdır. Ahşap gibi organik yapı malzemeleri yangına karşı doğası gereği savunmasızdır. Ancak doğru kimyasal müdahalelerle bu malzemelerin alev alma süreleri uzatılabilir, ısı yayılımı azaltılabilir ve duman oluşumu kontrol altına alınabilir (Horrocks & Price, 2008).

CLT panellerde yangın geciktirici kimyasallar farklı yöntemlerle uygulanabilir. Bu yöntemler malzemenin dayanımı, görünümü ve yangın performansı üzerinde farklı etkiler yaratır: Yüzey kaplaması: Sprey veya fırça ile uygulanan kaplamalar,

çoğunlukla iç mekânlarda dekoratif ve geçici çözüm sunar. UV dayanımı düşüktür. Vakum basınçla emprenye: Kimyasallar ahşabın hücre duvarlarına kadar nüfuz eder. Kalıcı ve yüksek etkili bir çözümdür ancak mekanik özellikleri azaltabilir. Endüstriyel kaplama sistemleri: Üretim sürecinde yüzeye entegre edilen intümesan boyalar veya reçineler, özellikle DIBt gibi Avrupa onaylarına sahip ürünlerde tercih edilmektedir (Nordtreat, 2023). Özellikle NT DECO gibi su bazlı, biyolojik içerikli, çevre dostu ve DIBt onaylı ürünler, son yıllarda CLT panellerde sürdürülebilir yangın koruma çözümleri olarak yaygınlaşmaktadır. Bu ürünler ahşabın nefes alabilirliğini korurken yangın sınıfını da Euroclass B-s1,d0 seviyesine yükseltebilmektedir (Nordtreat, 2023).

Yangın geciktiriciler çeşitli fiziksel ve kimyasal yollarla etki eder.

Fiziksel engelleme: Yanıcı gaz çıkışını engelleyen karbonlaşmış yüzey tabakası oluştururlar. Endotermik reaksiyon: Isıyı absorbe ederek sıcaklık yükselmesini yavaşlatırlar. Serbest radikal baskılama: Alevlerin yayılmasını sağlayan serbest radikallerle tepkimeye girerek zincirleme reaksiyonları durdururlar. Gaz fazı etkisi: Yanmayı baskılayıcı inert gazlar (örneğin azot) üreterek oksijen ile reaksiyonu kesintiye uğratırlar (Weil & Levchik, 2009).

### **CLT Panellerde Yangın Geciktirici Kimyasalların Performansa Etkisi**

Yapılan deneysel çalışmalar, bor bileşikleri ve fosfat bazlı geciktiricilerin karbonlaşma kalınlığını artırdığını ve CLT panellerin ısıya dayanım süresini uzattığını göstermektedir (Song & ark., 2014). Ancak bu kimyasalların yoğunluğu ve nem etkisi, bazı durumlarda malzemenin mekanik özelliklerinde azalmaya yol açabilir. Bu nedenle dengeleyici formülasyonlar ve dış ortam koruyucularla birlikte kullanılması önerilmektedir. Ayrıca

sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, organik fosfor içeren doğal kökenli geciktiricilerin, geleneksel halojenli kimyasallara kıyasla çevreye daha az zarar verdiği ve toksik gaz üretimini büyük oranda düşürdüğü bilinmektedir (Alongi & ark., 2015).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, koruyucu işlemlerin CLT panellerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı şekilde incelemiştir (Lim & ark., 2020: 2; Adnan & ark., 2021:286; Bagheri & ark., 2022: 15; Ayanleye, 2023: 88; Quin & ark., 2024: 2; Quin & ark., 2025: 3774). Bu araştırmalar, bakır ve borat bazlı koruyucuların genellikle yapısal bütünlüğü koruyarak çürüme, termit ve yangına karşı direnci artırdığını, delaminasyon oranlarını düşürdüğünü ve bazı durumlarda bağ dayanımını iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, uygulama yöntemi, kimyasal formülasyon ve yapıştırıcı tipi gibi etkenlerin kombinasyonu, mekanik performansı önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Uygun şekilde seçilen koruyucu işlemler CLT'nin hizmet ömrünü uzatırken, yanlış kombinasyonlar yapısal zayıflıklara yol açabilmektedir. Bu nedenle hem biyolojik hem de mekanik açıdan dengeli çözümler geliştirilmesi, CLT'nin güvenli ve sürdürülebilir kullanımı açısından kritik öneme sahiptir.

### **Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etki**

Çalışmada çapraz lamine ahşap (CLT) panellerin sürdürülebilirlik potansiyeli, kullanılan malzeme ve kimyasal içerikler açısından çevresel etkileriyle birlikte değerlendirilmiştir. Ahşabın karbon depolama kapasitesi ve düşük enerji gereksinimi sayesinde, CLT panellerin beton ve çelik gibi geleneksel yapı malzemelerine kıyasla daha çevreci bir alternatif sunduğu tespit edilmiştir (Gustavsson & ark., 2010: 231; FPInnovations, 2011; Balasbaneh & Sher, 2024: 2). Ayrıca, üretim ve montaj süreçlerinde sağladığı verimlilikle karbon ayak izini azalttığı görülmüştür.

Bununla birlikte, yangın dayanımını artırmak amacıyla uygulanan yanmayı geciktirici kimyasalların çevresel etkileri de analiz edilmiştir. Halojen içeren eski nesil geciktiricilerin toksik ve kalıcı etkileri nedeniyle tercih edilmediği, bunun yerine su bazlı ve VOC oranı düşük ürünlerin kullanıldığı belirlenmiştir (Weil & Levchik, 2009; Nordtreat, 2023). Elde edilen bulgular, sürdürülebilir yapı malzemesi seçiminin yalnızca fiziksel performans değil, aynı zamanda çevresel uyumluluk temelli de yapılması gerektiğini ortaya koymuştur. Günümüzde yapı sektöründe sürdürülebilirlik, yalnızca malzeme seçimiyle değil, kullanılan kimyasalların çevresel etkileri, üretim süreçlerinin karbon ayak izi ve yaşam döngüsü analizleri (LCA) ile bütünsel olarak ele alınmaktadır. Bu bağlamda, çapraz lamine ahşap (CLT) paneller ve bu panellere uygulanan yanmayı geciktirici kimyasalların çevresel performansı, yeşil bina sertifikasyonları ve karbon emisyonu açısından önemli değerlendirme kriterleridir.

CLT paneller, yenilenebilir bir kaynak olan ahşaptan üretilmektedir. Ahşap, büyüme süreci boyunca atmosferden karbondioksit (CO<sub>2</sub>) çekerek karbon depolayan bir malzemedir. Bu yönüyle CLT, yaşam döngüsü boyunca net karbon salımı negatif olabilen az sayıdaki yapı malzemesinden biridir. Bir ton kereste, atmosferden yaklaşık 1.8 ton CO<sub>2</sub> tutabilir (FPInnovations, 2011). Ayrıca CLT üretiminde kullanılan odun, çoğunlukla hızlı büyüyen ve sürdürülebilir ormancılıkla yönetilen türlerden elde edilir. Bu sayede doğal kaynakların tükenmesi önlenir ve orman ekosistemlerinin sürekliliği korunur.

Üretim sürecinin enerji tüketimi, beton ve çelik gibi geleneksel malzemelere kıyasla çok daha düşüktür (Gustavsson & ark., 2010). Montaj sürecindeki ön üretim avantajı, şantiyelerde atık üretimini azaltmakta ve daha kısa sürede bina inşasını mümkün kılmaktadır. Bu da enerji, su ve iş gücü verimliliğine katkıda bulunur.

CLT panellerin yangın dayanımını artırmak amacıyla kullanılan kimyasalların çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri, sürdürülebilir yapı anlayışı çerçevesinde dikkatle ele alınmalıdır. Özellikle halojen içeren eski nesil geciktiricilerin, toksik gaz salınımı, toprak ve su kirliliği ve biyobirikim gibi olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir (Weil & Levchik, 2009). Günümüzde çevresel etkileri minimize etmek amacıyla halojensiz, su bazlı, biyolojik kaynaklı ve düşük uçucu organik bileşik (VOC) içeren formülasyonlar tercih edilmektedir. Örneğin, NT DECO gibi su bazlı, organik içerikli yangın geciktiriciler, CLT yüzeyine zarar vermeden yangın performansını artırırken toksik salınımları da en aza indirir (Nordtreat, 2023). Bu tür ürünler ayrıca LEED, BREEAM gibi yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde olumlu katkılar sağlamaktadır.

CLT panellerin yaşam döngüsü analizi, hammaddenin temininden yapının kullanım ömrü sonuna kadar olan tüm çevresel etkileri değerlendirmeyi amaçlar. Yapılan LCA çalışmalarına göre CLT, özellikle sera gazı emisyonları, birincil enerji kullanımı, asitlenme potansiyeli ve fotokimyasal ozon oluşumu gibi çevresel etki kategorilerinde düşük değerlere sahiptir (Lippke & ark., 2004: 9).

Yanmayı geciktirici kimyasalların yaşam döngüsüne olan katkısı ise, formülasyonun biyolojik bozunabilirliği, toksik kalıcılığı ve üretim sürecindeki enerji tüketimi gibi etkenlerle ölçülür. Bu nedenle sürdürülebilir CLT uygulamaları için kimyasal seçimi, yalnızca yangın performansı değil, çevresel uyumluluk açısından da önem taşır.

CLT panellerin doğal yapısı, kullanım ömrü sonunda kompostlanabilir veya enerji geri kazanımı için kullanılabilir olmalarını sağlar. Ancak panellere uygulanan kimyasal işlemler bu süreci etkileyebilir. Halojenli veya ağır metal içeren katkılar, panelin

geri dönüşümünü zorlaştırabilir veya özel bertaraf işlemleri gerektirebilir.

Bu nedenle çevre dostu CLT sistemlerinde tercih edilen yanmayı geciktiricilerin çevre mevzuatlarına (örneğin REACH, RoHS) uygunluğu ve panelin biyolojik çözünürlüğünü bozmaması büyük önem taşır.

## **Sonuçlar**

Bu çalışmada, yapı sektöründe kullanım alanı giderek genişleyen çapraz lamine ahşap (CLT) panellerin yangın performansı ve bu performansın artırılmasında rol oynayan yanmayı geciktirici kimyasallar detaylı şekilde ele alınmıştır. Çalışmanın başlıca bulguları ve önerileri şu şekilde özetlenebilir:

CLT paneller, yüksek taşıma kapasitesi, hafiflik, estetik görünüm ve sürdürülebilir üretim gibi avantajlarıyla modern mimaride öne çıkan bir yapı malzemesidir. Ancak organik yapısı nedeniyle yangına karşı belirli zayıflıkları bulunmaktadır. Bu nedenle panellerin yangın güvenliği açısından değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi, yapıların bütünlüğü ve kullanıcı güvenliği için kritik önemdedir.

Yapılan literatür taraması ve standart analizler göstermektedir ki:

- CLT paneller, karbonlaşma yoluyla belirli bir süre yangına direnç gösterebilmekte, fakat yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kaldıklarında delaminasyon (katman ayrılması) gibi riskler taşımaktadır.
- EN 1365, ASTM E119 ve ISO 834 gibi standartlara göre yapılan yangın dayanım testleri, bu panellerin performanslarının ölçülmesinde güvenilir araçlardır.

- Yangın dayanımının artırılması için kullanılan yanmayı geciktirici kimyasallar hem yüzey kaplaması hem de emprenye yöntemiyle uygulanabilmektedir.
- Geleneksel halojenli ürünlerin yerini alan halojensiz, biyobozunur, su bazlı ürünler hem insan sağlığı hem çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli gelişmeler sunmaktadır.
- CLT, karbon tutma kapasitesi, düşük enerji kullanımı ve atık azaltımıyla çevresel açıdan sürdürülebilir bir yapı çözümüdür.

Yangın güvenliği tasarıma entegre edilmelidir. CLT kullanılan projelerde daha proje aşamasında yangına karşı alınacak önlemler belirlenmeli, yangın yönetmeliği ile uyumlu malzeme seçimleri yapılmalıdır.

Delaminasyon etkisi göz önüne alınmalıdır: Yangın sırasında tabakaların ayrılması gibi riskler, özellikle kalın panellerde daha fazla olabilir. Bu nedenle panelin üretim kalitesi, yapıştırıcı özellikleri ve katman sayısı dikkatle değerlendirilmelidir.

Çevre dostu geciktiriciler tercih edilmelidir: Yangın dayanımı artırılırken malzemenin çevresel etkisi ihmal edilmemelidir. Halojensiz, VOC içeriği düşük, LEED ve BREEAM uyumlu ürünler tercih edilmelidir. Yerel ve uluslararası standartlara uygunluk sağlanmalıdır: Türkiye’de henüz CLT üretimi sınırlı olsa da Avrupa ve ABD standartları esas alınarak ürün sertifikasyonu yapılmalı, ürünlerin CE ve DIBt belgelerine sahip olması teşvik edilmelidir. Araştırmalar artırılmalıdır: Özellikle Türkiye gibi deprem ve yangın riski yüksek ülkelerde CLT gibi yeni nesil yapı malzemelerinin hem yangın hem de çoklu risk koşullarında davranışlarını inceleyen deneysel ve sayısal araştırmalar desteklenmelidir.

CLT paneller, sürdürülebilir yapılaşma hedefleriyle uyumlu, çevre dostu ve mühendislik açısından güçlü bir yapı malzemesidir. Ancak yangın güvenliği gibi kritik konularda yapılan çalışmalar, bu malzemenin kullanım alanlarının daha da genişletilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Yanmayı geciktirici kimyasalların doğru seçimi ve uygulanmasıyla CLT, yangına dayanıklı ve sürdürülebilir bir yapı alternatifi olarak modern inşaat sektöründe güvenle kullanılabilir hâle gelmektedir.

## Kaynakça

Adnan, N. A., Md Tahir, P., Husain, H., Lee, S. H., Anwar Uyup, M. K., Mat Arip, M. N., & Ashaari, Z. (2021). Effect of ACQ treatment on surface quality and bonding performance of four Malaysian hardwoods and cross laminated timber (CLT), *European Journal of Wood and Wood Products*, 79, 2, 285–299. Doi: 10.1007/s00107-020-01609-7

Alongi, J., Ciobanu, M., Tata, J., Frache, A., & Camino, G. (2015). Recent advances in flame retardant polymeric coatings for wood, *Polymer Degradation and Stability*, 113, 110–121.

ASTM E119-20, (2020). Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. ASTM International.

Ayanleye, S. O. (2023). Development of preservative-treated cross-laminated timber and lignin-reinforced polyurethane-adhesive for glued laminated timber (Doctoral dissertation, Mississippi State University). Mississippi State, MS, USA.

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. Doi: 10.1186/s10086-022-02041-6

Balasbaneh, A. T., & Sher, W. (2024). A systematic literature review of life cycle sustainability assessment of mass timber in the construction industry toward circular economy. *Environment, Development and Sustainability*, 1-37. Doi: 10.1007/s10668-024-05377-9

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

Ceccotti, A. (2008). New technologies for construction of medium-rise buildings in seismic regions: The XLAM case. *Structural Engineering International*, 18(2), 156-165. Doi: 0.2749/101686608784218680

EN 1365-1, (2000). Fire resistance tests for loadbearing elements - Part 1: Walls. European Committee for Standardization.

EN 16351, (2015). Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. European Committee for Standardization.

FPIinnovations, (2011). Cross-Laminated Timber Handbook. Canada Wood Council.

Frangi, A., Fontana, M., Hugi, E., & Jübstl, R. (2009). Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire, *Fire Safety Journal*, 44, 8, 1078-1087. Doi: 10.1016/j.firesaf.2009.07.007

Frangi, A., Fontana, M., Knobloch, M., & Bochicchio, G. (2008). Fire behaviour of cross-laminated solid timber panels. *Fire Safety Science*, 9, 1279-1290.

Gagnon, S., & Pirvu, C. (2011). Cross-Laminated Timber Handbook. FPIinnovations.

Gustavsson, L., Sathre, R., & Joelsson, A. (2010). Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building, *Energy and Buildings*, 42, 2, 230–242. Doi: 10.1016/j.enbuild.2009.08.018

Gümüştas, M. (2021). Farklı taşıyıcı sistemlerin yangın anındaki davranışı ve güvenlik önlemleri (Master's thesis, Istanbul Sabahattin Zaim University (Turkey)).

Hasburgh, L., Bourne, K., Peralta, P., Mitchell, P., Schiff, S., & Pang, W. (2016). Effect of adhesives and ply configuration on the

fire performance of Southern pine cross-laminated timber. In *World Conference on Timber Engineering* (p. 10).

Horrocks, A.R., & Price, D. (2008). *Fire Retardant Materials*. Woodhead Publishing.

Ilgın, H. E., & Yücel, O. (2023). Yüksek Ahşap Binalarda Yangın Güvenliği: Lighthouse Joensuu (Finlandiya)'dan Çıkarımlar.

König, J., & Walleij, L. (2000). Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires: Part 2. A design model for standard fire exposure. SP Report 2000:19.

LeVan, S. L., & Winandy, J. E. (1990). Effects of fire retardant treatments on wood strength: a review. *Wood and fiber science*, 113-131.

Lim, H., Tripathi, S., & Li, M. (2020). Rolling shear modulus and strength of cross-laminated timber treated with micronized copper azole type C (MCA-C), *Construction and Building Materials*, 259, 120419. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120419

Lindersson, E., Askari, M., Vakili, A., Dahlberg, J., Kioumarsı, M., & Shafei, B. (2025). Structural Response of CLT Bridge Decks to Heavy Vehicle Loads: A Serviceability Evaluation. In: Kioumarsı, M., Shafei, B. (eds) *The 1st International Conference on Net-Zero Built Environment*. NTZR 2024. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 237. Springer, Cham. Doi: 10.1007/978-3-031-69626-8\_110

Lippke, B., Wilson, J., Perez-Garcia, J., Bowyer, J., & Meil, J. (2004). CORRIM: Life-cycle environmental performance of renewable building materials. *Forest Products Journal*, 54(6), 8-19.

Mohammad, M., Gagnon, S., Douglas, B. K., & Podesto, L. (2012). Introduction to cross laminated timber. *Wood Design Focus*, 22(2), 3-12.

Nordtreat. (2023). NT DECO: Ecological flame retardant for CLT. <https://www.nordtreat.com>

Oh, J. K., Lee, J. J., & Hong, J. P. (2015). Prediction of compressive strength of cross-laminated timber panel. *Journal of wood science*, 61(1), 28-34. Doi: 10.1007/s10086-014-1435-x

Owolabi, D. & Loss, C. (2023). Experimental and Numerical Assessment of the Structural Performance of a Prefabricated Hybrid CLT-steel Floor Module. In: Gupta, R., et al. *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2022*. CSCE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 348. Springer, Cham. Doi: 10.1007/978-3-031-34159-5\_38

Östman, B., Mikkola, E., Stein, R., Frangi, A., & König, J. (2010). Fire safety in timber buildings. Technical guideline, SP Technical Research Institute of Sweden.

Popovski, M. & Gavric I. (2015). Performance of a 2-Story CLT House Subjected to Lateral Loads, *Journal of Structural Engineering*, 142, 4, E4015006. Doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001315

Quin Jr, F., Franca, T., Undadi, H., Shmulsky, R., Franca, F., & Henfield, B. (2025). Bonding durability and rolling shear strength of commercially produced southern yellow pine cross-laminated timber treated with micronized copper azole (MCA). *BioResources*, 20(2), 377. Doi: 10.15376/biores.20.2.3773-3787

Quin Jr, F., Ayanleye, S., Franca, T. S., Shmulsky, R., & Lim, H. (2024). Bonding performance of preservative-treated cross-laminated timber (CLT) posttreated with CU-based preservatives. *Forest Products Journal*, 73(4), 326-338. Doi: 10.13073/FPJ-D-23-00031

Schickhofer, G., Bogensperger, T., & Moosbrugger, T. (2010). Design of solid timber panels in plane. *Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering*.

Song, K., Kang, I.A., & Sim, H. (2014). Thermal performance of CLT with fire-retardant-treated timber layers. *BioResources*, 9, 1, 910–923.

Weil, E. D., & Levchik, S. V. (2009). Flame retardants for plastics and textiles: practical applications. Hanser Publishers.

Zelinka, S., Pei, S., Bechle, N., Sullivan, K., Ottum, N., Rammer, D., & Hasburgh, L. E. (2018). Performance of wood adhesive for cross laminated timber under elevated temperatures. In *In: Proceedings, WCTE 2018-world conference on timber engineering. Seoul, Republic of Korea: Korean Institute of Forest Science. 7 p.*

## BÖLÜM 3

# KARBON SEKESTRASYONUNDA MİKORİZANIN ROLÜ

**Meral ÖDEMİŞ<sup>1</sup>**  
**Bülent TOPRAK<sup>2</sup>**  
**Çiğdem KÜÇÜK<sup>3</sup>**

### Giriş

Toprak, dünya üzerindeki en büyük karasal karbon havuzlarından biri olarak görülmektedir; karasal ekosistem karbonunun yaklaşık %80'i toprakta organik karbon (SOC) şeklinde depolanmaktadır. Dolayısıyla toprakta karbon birikimini arttıran biyolojik etmenlerin, iklim değişikliğinin etkilerini hafifletmede stratejik bir role sahip olduğu anlaşılmaktadır (Jobbágy & Jackson, 2000; 423).

Bu biyolojik etmenlerin başında mikoriza mantarları gelmektedir. Mikoriza, bitki kökleriyle toprak mantarları arasında kurulan karşılıklı yararlı dayalı simbiyotik bir ilişkidir (Smith & Read, 2010). Fotosentez aracılığıyla üretilen karbon bileşikleri

---

<sup>1</sup> Doktora Öğrencisi, Harran Üniversitesi, Biyoloji Bölümü, Orcid:0000-0001-8750-8154

<sup>2</sup> Prof.Dr., İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Orman mühendisliği, Orcid:0000-0001-6500-7885

<sup>3</sup> Prof.Dr., Harran Üniversitesi, Biyoloji Bölümü, Orcid:0000-0001-5688-5440

özellikle şekerler ve yağ asitleri kök eksudatları ve mantar hifleri vasıtasıyla rizosfere aktarılmaktadır (Högberg ve ark., 2010; 485). Çalışmalar, bitkilerin fotosentetik olarak ürettikleri karbonun yaklaşık %10–20’sini mikorizal mantarlara ilettiklerini göstermektedir (Smith & Read, 2010). Atmosferde biriken CO<sub>2</sub>’nin kara ekosistemlerine taşınmasında bitki–kök–mikoriza bağlantısı temel biyolojik kanal olup, fotosentetik karbonun toprak organik karbon havuzlarına iletilmesinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Högberg ve ark., 2010; 485). Bu sebeple atmosferik karbon yükünün toprakta ne ölçüde ve ne kadar zamanla depolanabileceği, büyük oranda mikorizal mantarların hif aracılığıyla karbon transfer yeterliliğine ve toprak–bitki–mantar etkileşimlerinin işlevselliğine bağlı olmaktadır (Huang ve ark., 2022; 1469). Küresel bitkiler aracılığıyla her sene mikorizal mantarlara iletilen 3.5–5 Gt karbonun, karasal ekosistemlerdeki karbon depolama yeterliliklerinin belirlenmesinde önemli bir biyolojik akış olduğu bildirilmiştir (Hawkins ve ark., 2023; R560).

Mikoriza mantarları, bu karbonu sadece kendi metabolik faaliyetlerinde kullanmamaktadır; aynı zamanda toprakta uzun vadeli karbon depolama sürecine de katkı sağlamaktadır. Özellikle arbusküler mikoriza mantarları (AMF), glomalin olarak bilinen ve karbon bakımından zengin bir glikoprotein üretmektedirler. Bu madde, toprakların agregat stabilitesini arttırarak organik karbonun mineralizasyonunu yavaşlatmaktadır. Bundan dolayı, mikoriza mantarları; hem karbonun biyolojik döngüsünde aktif rol oynamaktadır hem de karbonun toprakta fiziksel olarak korunmasına da katkı sağlamaktadır (Rillig ve ark., 2015; 1385).

Ektomikoriza mantarları (EMF), özellikle orman ekosistemlerinde baskın olup, lignin ile selüloz benzeri dirençli organik bileşenlerin parçalanmasında görev almaktadır (Clemmensen ve ark., 2013; 1615). Son zamanlarda yapılan çalışmalar, mikorizal birlikteliklerin yalnızca bitki beslenmesi

bakımından değil de, küresel karbon dengesi bakımından da önemli olduğunu vurgulamaktadır (Tao ve ark., 2024; 213; Li ve ark., 2024; 456). Bununla beraber, mikorizal karbon akışları, toprak tipi, bitki türü, mantar türü ve çevresel stres faktörlerine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilirler (Terrer ve ark., 2021; 599).

Son zamanlarda yapılan modelleme çalışmaları, mikoriza dağılımının kara ekosistemlerinde karbon depolamasındaki önemini ortaya koymuştur (Huang ve ark., 2022; 1469). Fotosentetik karbonun rizosfere yönlendirilmesinde mikorizal yapıların rolü, özellikle karbonun kısa döngüden uzun döngüye geçişinde belirleyici bir süreç olarak görülmektedir (Högberg ve ark., 2010; 485).

### **Mikoriza Çeşitleri ve Karbon Talepleri**

Mikoriza mantarları, bitki kökleriyle simbiyotik ilişkiler kurarak hem bitkinin hem de kendi metabolik ihtiyaçlarını karşılayan karbon alışveriş mekanizması oluşturur. Bu simbiyotik birlikteliklerin evrimsel geçmişi yaklaşık 400 milyon yıl öncesine, kara bitkilerinin ilk ortaya çıktığı zamana kadar uzanmaktadır (Redecker ve ark., 2000; 1920). Günümüzde bitkilerin yaklaşık %80-90'ının kökleri mikorizal mantarlarla birliktelik oluşturmaktadır (Smith & Read, 2010). Fakat bu ilişkilerin karbon dinamiğine etkisi, mikoriza türlerine göre önemli farklılıklar meydana getirmektedir. Genel olarak mikoriza mantarları; arbusküler mikoriza (AMF), ektomikoriza (EMF), erikoid mikoriza (ERM) ve orkid mikoriza (ORM) olmak üzere dört temel gruba ayrılmaktadır. Her bir türün karbon isteği, konak bitkiden aldıkları karbon oranları, karbonun metabolik kullanımları ve toprakta dönüştürülme şekilleri bakımından değişiklik göstermektedir (Brundrett, 2009; 37).

AMF, özellikle otsu bitkiler, tarımsal bitkiler ve tropikal ekosistemlerde baskın olmaktadır. *Glomeromycota* şubesine ait olan

bu mantarlar, bitki kök hücrelerinin içine “arbuskül” ve “vezikül” olarak bilinen yapılarla girerek direkt olarak madde alışverişini sağlamaktadırlar (Smith & Read, 2010). AMF’lerin karbon istekleri, bitkinin fotosentetik aktivitesine bağlıdır; fotosentez miktarları arttıkça mantara iletilen karbon oranı da artar (Jakobsen ve ark., 2002; 75).

Fotosentezle üretilen karbon bileşikleri özellikle heksoz ve organik asitler, mantar hifleriyle taşınmakta olup enerji kaynağı olarak kullanılmaktadırlar. Bu karbonun bir kısmı glomalın olarak adlandırılan, toprakta uzun süre kalabilen bir glikoprotein yapısına dönüştürülmektedir (Rillig, 2004; 740). Glomalın, hem toprak agregat stabilitesini artırarak karbonu fiziksel olarak korumakta, hem de karbon döngüsünün yavaşlamasına katkı sağlamaktadır (Rillig ve ark., 2015; 1385). AMF’nin karbon isteği genellikle bitkinin toplam fotosentez ürününün %10–20’si arasında değişmektedir (Treseder, 2004; 347). Bununla birlikte, çevresel stres şartları (örneğin azot eksikliği veya kuraklık) altında bu miktar artabilir (Leake ve ark., 2004; 1016). Ayrıca AMF’nin hif döngüsü, toprağa düzenli bir şekilde karbon girişi sağlayarak çayır ve tarım ekosistemlerindeki karbon stabilizasyonunun temel biyolojik etkenlerinden biridir (Hawkins ve ark., 2023; R560).

EMF genellikle orman ekosistemlerinde, özellikle çam (*Pinus*), meşe (*Quercus*), kayın (*Fagus*) ve huş (*Betula*) türleriyle simbiyoz meydana getirmektedir. Bu mantarlar kök hücrelerinin dışına yerleşir ve kök etrafında “mantarsal kılıf” oluştururlar. Ayrıca kök hücreleri arasında uzanan Hartig ağı, karbon ve besin alışverişinin gerçekleştiği ana bölgedir (Courty ve ark., 2010; 679).

EMF’lerin karbon isteği genellikle AMF’ye göre daha yüksek olmaktadır; bazı türlerde bitkiden alınan karbon miktarı %30’a kadar yükselebilmektedir (Nehls ve ark., 2010; 292). Ektomikoriza, baskın boreal ormanlarda yıllık 3–5 ton C ha<sup>-1</sup> hif kaynaklı karbon transferi meydana getirdiği ve bunun toprak karbon

depolamalarının uzun dönemli stabilizasyonunda belirleyici olduğu incelenmiştir (Averill ve ark., 2014; 543). Bunun sebebi, EMF'nin daha karmaşık hif ağları geliştirmesi ve lignin benzeri dirençli organik maddelerin parçalanmasında aktif enzim sistemlerini kullanmasıdır. Bu özellik, EMF'nin karbonu hem enerji kaynağı olarak kullanmada hem de toprağın organik madde dönüşümünde aracı olarak kullanmasını sağlar (Clemmensen ve ark., 2013; 1615). Ektomikorizal türlerin lignin ve selülozu ayrıştıran enzim sistemleri, karbonun ayrışmaya dirençli fraksiyonlara dönüşmesini sağlayarak iklim değişikliğine karşı daha kalıcı karbon havuzları meydana getirirler (Clemmensen ve ark., 2013; 1615). EMF'nin karbon isteği, orman ekosistemlerinde karbon depolama dengesini direkt olarak etkiler; örneğin boreal ormanlarda mantar hifleri vasıtasıyla senede yaklaşık 3–5 ton C ha<sup>-1</sup> karbon akışı gerçekleştiği varsayılmaktadır (Averill ve ark., 2014; 543).

ERM, özellikle asidik topraklarda yaşayan *Ericaceae* familyası bitkileriyle simbiyotik birliktelik kurar. ERM mantarlarının karbon isteği göreceli olarak düşüktür fakat organik maddece zengin ortamlarda azot ve fosfor mobilizasyonunda kritik rol oynar (Smith & Read, 2010). ORM ise *Orchidaceae* türlerinde görülür ve bitkinin erken gelişim evrelerinde neredeyse tamamen mantara bağımlı karbon alımıyla karakterize olmaktadır (Dearnaley, 2007; 475).

Mikoriza türleri arasında karbon isteği bakımından belirgin farklılıklar bulunmaktadır. AMF, fotosenteze direkt olarak bağlı düşük-orta seviyelerde karbon akışıyla karakterize edilirken; EMF yüksek karbon isteği ve toprak karbon stabilizasyonu üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bu farklılıklar, ekosistemlerin karbon dengesinin modellenmesinde mikoriza topluluk yapısının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Terrer ve ark., 2019; 684).

EMF'nin kompleks enzim sistemleri sayesinde lignin bozunmasını yavaşlatması, karbonun daha stabil şekillere

dönüşmesine aracılık ederek uzun zamanlı sekestrasyon kapasitesini artırmaktadır (Clemmensen ve ark., 2013; 1615). ORM'nin bitkinin erken hayat evrelerinde neredeyse tamamen karbon sağlayıcı olması, bu mikoriza tipini ekolojik adaptasyon bakımından benzersiz bir kategori hâline getirmektedir (Dearnaley, 2007; 475). Karasal ekosistem bitkilerinin yaklaşık %70'i AM, %2'si EM ve %1'inden azı ise erikoid mikoriza ile kolonize olur; bu dağılım, karasal karbon akışlarının büyük bölümünün AM mantarları üzerinden gerçekleştiğini göstermektedir (Hawkins ve ark., 2023; R560). Arbusküler mikorizal bitkiler, küresel bitki örtüsünün %55'inden fazlasını meydana getirmekte ve fotosentetik net birincil üretimin büyük bir kısmını AM ağlarına tahsis etmektedir (Hawkins ve ark., 2023; R560). Ektomikoriza (EM) mantarlarının karbon talebi yüksek olup, bazı orman ekosistemlerinde bitkinin yıllık net birincil üretiminin (NBÜ) %30–50'sine kadar karbonun mantara iletildiği bildirilmiştir (Hawkins ve ark., 2023; R560).

## **Karbon Akışı**

Küresel ölçekte AMF, karbon döngüsünde kritik bir rol oynamaktadır. Karasal ekosistemlerde AMF hifleri, bitki köklerinden toprağa karbon transferinde temel bir araçtır ve bu sayede karbonun toprak profiline taşınmasında kilit bir mekanizma oluşturmaktadır (Finlay, 2008; 1115). AMF'ler, konakçı bitkiden aldıkları karbonu ekstraradikal hif ağı aracılığıyla toprak agregatlarına ileterek karbon stabilizasyonunu artırmakta ve aynı zamanda rizosferdeki solunum kayıplarını sınırlayarak net karbon tutulumuna katkı sağlamaktadır (Zhu ve Miller, 2003; 407). Artan atmosferik CO<sub>2</sub> konsantrasyonları altında, bitkiden AMF'ye aktarılan karbon miktarının arttığı ve bunun AMF biyokütlesi ile hif gelişimini teşvik ettiği bildirilmiştir (Porcel ve ark., 2016; 673; Drigo ve ark., 2010; 10938). Bu süreçte konakçı bitki, fotosentez yoluyla sabitlediği karbonu kullanarak mikorizal simbiyozun karbon gereksinimini karşılamaktadır (Parihar ve ark., 2020; 1581). Ayrıca,

toprak mikrobiyal biyokütlesinin önemli bir kısmını (%20–80) oluşturan AMF ekstraradikal hifleri, toplam toprak organik karbonunun yaklaşık %15'ine katkıda bulunarak karbonun toprakta tutulmasında belirleyici bir bileşen olarak öne çıkmaktadır (Leake ve ark., 2004; 1016).

Toprak sistemlerinde karbon akışı, organik karbon girdilerinin mikrobiyal topluluklar tarafından hızla kullanılmasıyla dinamik bir şekilde düzenlenmektedir. Özellikle kolay ayrışabilir karbon kaynaklarının (örneğin glukoz) toprağa ilavesi, mikrobiyal aktiviteyi önemli ölçüde artırarak mikrobiyal biyokütle karbonu (MBC) ve mikrobiyal biyokütle fosforunun (MBP) birikimini teşvik etmektedir. Bu süreçte karbon akışı, bitki–toprak sistemi yerine büyük ölçüde mikrobiyal havuzlara yönelmekte ve böylece çözünür besin elementleri mikroorganizmalar tarafından immobilize edilmektedir. Nitekim karbon ilavesinin, suda çözünür fosfor fraksiyonlarını azaltırken mikrobiyal biyokütlerde karbon ve fosfor birikimini artırdığı bildirilmektedir. Bu durum, karbon akışının yalnızca enerji transferi değil aynı zamanda besin elementlerinin biyoyararlanabilirliğini düzenleyen temel bir mekanizma olduğunu göstermektedir. Ayrıca artan karbon girdileri, hızlı çoğalan mikroorganizmaların baskın hale gelmesine yol açarak, bitki kökleri ile mikroorganizmalar arasında azot ve fosfor için rekabeti artırmakta; kısa vadede bitki besin alımını sınırlayabilmektedir. Dolayısıyla karbon akışı, mikrobiyal immobilizasyon ve mineralizasyon süreçleri arasındaki denge üzerinden hem toprak verimliliğini hem de bitki büyümesini belirleyen kritik bir ekosistem süreci olarak değerlendirilmiştir (Zhou ve ark., 2025; 1644448).

Mikoriza mantarlarının kök sistemleriyle kurduğu simbiyoz, sadece bitki–mantar arasında değil, aynı zamanda mikrobiyal topluluklarla çok yönlü bir etkileşim ağı meydana getirir. Rizosfere aktarılan karbon bileşikleri, *Azotobacter*, *Pseudomonas* ve *Bacillus* türü bakteriler için önemli enerji kaynakları olmaktadır. Bu

bakteriler, karbon bileşiklerini kullanarak organik asit ve enzim üretimini artırır, böylece hem besin elementlerinin çözünürlüğünü hem de toprak karbon stabilitesini destekler. Bu etkileşim, “mikorizal mikrobiyal kompleks” olarak adlandırılan bir yapının temelini meydana getirmekte ve karbonun kısa döngüden uzun döngüye geçişinde aracılık etmektedir. Dolayısıyla mikoriza, karbonu sadece fiziksel olarak taşımakla kalmaz; toprak mikrobiyotasının biyokimyasal aktivitesini yönlendirerek karbonun stabil formda depolanmasına katkı sağlar. Mikoriza–karbon geri beslemeleri hesaba katılmadığında ekosistem modelleri toprak karbon depolarını sistematik biçimde düşük varsaymaktadır (Umer ve ark., 2025; 1616273). Bitkiler her yıl 3.58 Gt C karbonu mikorizal mantarlara iletmektedir. Bu, insan kaynaklı yıllık CO<sub>2</sub> emisyonlarının neredeyse altı katına eşittir. AM mantarlarının bitki köklerinden aldığı karbon oranı %4-20 arasında değişirken, bu oran ekosistem türüne ve mantar grubuna bağlı olarak farklılık göstermektedir. Karbon akışı, hif büyümesiyle beraber mikorizal ağların toprakta karbon stoğu, mineral yüzeylere bağlama ve mikroorganizmalara dağıtma süreçlerini de kapsamaktadır. EM mantarları, özellikle iğne yapraklı ve sert odunsu türlerde, kök dışı hifler vasıtasıyla toprak karbonunu derinlere taşımada daha etkilidir (Hawkins ve ark., 2023; R560).

### **Toprak Sekestrasyonu**

Atmosferdeki karbondioksit (CO<sub>2</sub>) konsantrasyonundaki artış, bitkilerde fotosentetik karbon üretimini artırarak arbusküler mikorizal mantarlara (AMF) aktarılan karbon miktarını yükseltmektedir. Bu artış, AMF'nin büyüme ve gelişimini teşvik ederek simbiyotik ilişkinin güçlenmesine katkı sağlamaktadır (Buckeridge ve ark., 2020; 36). Toprağa taşınan karbonun uzun zamanlı tutulumu yani karbon sekestrasyonu, karbonun fiziksel, kimyasal ya da biyolojik süreçlerle stabil formlara dönüşmesiyle sağlanır. Mikoriza mantarları bu süreçte iki temel yolda etkilidir: (i)

karbonun fiziksel olarak toprak agregatlarına bağlanmasını sağlamak, (ii) organik karbonun mineral yüzeylerle kimyasal bağlar oluşturmaya aracılık etmek (Huang ve ark., 2022; 1469). Özellikle AMF kökenli glomalin benzeri toprak proteinleri (GRSP), toprak yapısının stabilitesini artırarak organik karbonun ayrışmasını yavaşlatmaktadır (Rillig ve ark., 2015; 1385).

AMF'nin toprak karbon tutulumuna katkısı, birden fazla özgün mekanizma üzerinden gerçekleşmektedir (Shukla ve ark., 2025; 22). Bu mekanizmalar aşağıda verilmiştir:

### **1. Glomalin ile ilişkili toprak proteinleri (GRSP)**

GRSP'ler, AMF tarafından üretilen ve toprak parçacıklarını bir arada tutarak agregat oluşumunu sağlayan stabil glikoproteinlerdir. Bu proteinler, ayrışmaya dirençli karbon içerikleri sayesinde toprakta onlarca yıl kalabilmekte ve önemli bir karbon havuzu oluşturmaktadır (Singh ve ark., 2024; 100174). Ayrıca GRSP, toprak organik karbonunun (SOC) stabil bir bileşeni olarak uzun vadeli karbon depolanmasına katkı sağlar (Singh ve ark., 2024; 100174).

### **2. Organik madde agregasyonunun artırılması**

AMF hifleri, toprak parçacıkları ve organik maddeyi fiziksel olarak sararak mikroagregat oluşumunu teşvik eder (Ren ve ark., 2022; 307; Wu ve ark., 2024; 1417). Bu yapılar, organik karbonu mikrobiyal ayrışmaya karşı korur. Aynı zamanda AMF, bitki artıklarının daha stabil humik maddelere dönüşümünü hızlandırarak karbon stabilizasyonunu desteklemektedir (Leake ve ark., 2004; 1016).

### **3. Hifosfer**

Hiflerin geniş yüzey alanı ve salgıladığı düşük molekül ağırlıklı şekerler, organik asitler ve polimerik bileşikler, hifosferde yoğun mikrobiyal kolonizasyon için uygun bir ortam oluşturur (Welc

ve ark., 2010; 1534). Bu bileşikler, toprak bakterilerinin aktivitesini ve çoğalmasını teşvik eder (Li ve ark., 2023; 45).

#### **4. Mikrobiyal aktivitenin artırılması**

AMF, kök bölgesinden salgılanan karbon bileşiklerini toprak matriksine yönlendirerek mikrobiyal aktivitenin yoğunlaştığı alanları genişletir (Fernandez & Kennedy, 2018; 468). Bu durum aktif karbon havuzlarının artmasına ve karbon döngüsünün hızlanmasına katkı sağlar (Subramanian ve ark., 2019; 549).

#### **5. Nekromas oluşumu**

Mikorizal mantar biyokütlesi ve mikrobiyal biyokütlenin ayrışmasıyla oluşan nekromas, toprak organik maddesinin önemli bir öncüsüdür (Zhou ve ark., 2024; 176732). Melanize nekromasın ayrışmasının görece yavaş gerçekleşmesi, uzun süreli karbon depolanmasına zemin hazırlamaktadır (Fernandez & Kennedy, 2018; 468). Nekromasın parçalanmasıyla açığa çıkan azotun yeniden kullanılması ise besin döngüsünü destekleyerek karbonun toprakta tutulmasını pekiştirmektedir (Gou ve ark., 2024; 167425; Beidler ve ark., 2024). Ektomikorizal mantarların bu süreçte ayrışma dinamiklerinde önemli bir rol oynayabileceği de vurgulanmaktadır (Liu ve ark., 2021; 3929).

Ektomikoriza mantarları (EMF) ise karbon sekestrasyonuna farklı bir mekanizmayla katkı sunmaktadır. EMF, toprakta lignin ve selüloz benzeri dirençli organik bileşenleri parçalayarak daha kararlı karbon oluşumları meydana getirir (Clemmensen ve ark., 2013; 1615).

#### **Sekestrasyon Etkisinin Ölçülmesi**

AMF'nin ekosistemlerdeki önemli etkilerinden biri, glomalin üretimi aracılığıyla toprak yapısını iyileştirmesidir. Glomalin, topraktaki stabil karbonun yaklaşık %30-60'ını oluşturabilen önemli bir glikoproteindir. AMF'nin dış hif ağları, toprak parçacıklarını

mikroagregatlar hâlinde bir araya getirerek toprak porözitesini, stabilitesini ve verimliliğini artırmaktadır (Fall ve ark., 2022; 723892). Bu mekanizma yalnızca tarımsal alanlarda değil; çayır ve orman ekosistemlerinde de karbon tutulumunu desteklediğinden toprak koruma ve ekolojik restorasyon açısından büyük önem taşımaktadır (Shukla ve ark., 2025; 22).

Zhang ve ark. (2019; 152) tarafından yürütülen çalışmada, AMF aşılmasının kavak fidelerinde kök kolonizasyonunu %23,7'den %80'in üzerine çıkardığı ve özellikle kök kuru ağırlığında belirgin artış sağladığı gösterilmiştir. Aynı çalışmada AMF uygulamasıyla birlikte glomalınle ilişkili protein fraksiyonlarında (EE-GRSP ve T-GRSP) ve SOC tutulumunda da artış gözlemlenmiş; bu bulgu rizosferdeki besin döngüsü ve toprak yapısının iyileştiğine dair güçlü kanıtlar sunmuştur (Pauwels ve ark., 2023; 165).

Tropikal orman ekosistemlerinde gerçekleştirilen bir başka çalışmada, GRSP ile SOC arasındaki ilişki ayrıntılı biçimde incelenmiş; üst 10 cm'lik toprakta GRSP miktarının ortalama  $3,94 \pm 1,09$  mg cm<sup>-3</sup> olduğu ve SOC'nin yaklaşık %3,38'ini oluşturduğu saptanmıştır. NMR analizleri, GRSP'nin yüksek oranda aromatik ve karboksil karbon içerdiğini ortaya koymuş; bu durum GRSP'nin yapısal olarak SOC'ye kıyasla daha dirençli olduğuna işaret etmektedir (Shukla ve ark., 2025; 22).

GRSP'nin ayrışmaya karşı yüksek direnci ve yüksek rekalsitrans indeksi, AMF'nin karbon stabilizasyonundaki rolünü pekiştirmektedir. Plantasyon ve sekonder ormanlarda GRSP'nin rekalsitrans değerlerinin SOC'den daha yüksek olması, bu proteinlerin karbonun ayrışmasını yavaşlatarak uzun vadeli depolanmasına katkı sağladığına işaret etmektedir (Bhunja ve ark., 2019; 429).

Mikoriza türünün karbon sekestrasyonu üzerindeki etkisini modellemeye yönelik çalışmalar da AMF ve EMF'nin karbon

döngüsündeki farklı rollerini doğrulamaktadır. Huang ve ark. (2022; 1469) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, AMF ve EMF'nin karbon döngüsüne katkısı dışarıda bırakılan modellerin toprak karbon depolarını ciddi ölçüde düşük tahmin ettiği; mikoriza parametreleri modele eklendiğinde ise tahmin değerinin belirgin biçimde arttığı rapor edilmiştir. Bu bulgular, mikoriza mantarlarının karbonun yalnızca geçici değil, kalıcı olarak depolanmasında da biyolojik aracı işlevi gördüğünü kanıtlamaktadır.

### **Çevresel Faktörlerin Mikoriza–Karbon İlişkisine Etkisi**

Toprak organik karbon havuzu, biyosfer ile atmosfer arasındaki karbon alışverişinin önemli bir düzenleyicisidir. Karbon kaybı-kazanımı dengesinin korunması ve küresel iklim değişikliğinin hafifletilmesi için toprak karbon depolama kapasitesinin artırılması gerekmektedir (Díaz ve ark., 2009; 55). Toprak karbon depolaması; mikrobiyal topluluğun biyokütlesi, dinamikleri ve yan ürünlerin oluşum-bozunum dengesi üzerinden doğrudan; karbon döngüsü ve toprak agregasyonu aracılığıyla ise dolaylı olarak mikrobiyal aktiviteyle ilişkilidir (Six ve ark., 2006; 555).

AMF, toprak karbon depolama kapasitesinin artırılmasında kritik bir role sahiptir. Bitki fotosentetik ürünlerinin rizosfere aktarımı genellikle birkaç saat içinde gerçekleşmekte (Johnson ve ark., 2002; 1521) ve mikorizal ilişkilerin varlığının bitkinin karbon asimilasyonunu önemli ölçüde artırdığı, dolayısıyla toprağa karbon girişini yükselttiği belirlenmiştir (Calderón ve ark., 2012; 1614).

Toprak organik maddesinin (SOM) mineralizasyonundaki artışın küresel iklim değişikliğini daha da şiddetlendirebileceği dikkate alındığında, SOM'un toprak agregatlarında muhafaza edilmesi büyük önem kazanmaktadır. Bu noktada AMF hifleri ve sporları tarafından üretilen ve suda çözünmeyen glomalın

glikoproteini, toprak agregasyonunda belirleyici bir işlev üstlenmektedir (Ullah ve ark., 2019; 13749).

AMF kolonizasyonunun, glomalin üretimi yoluyla suya dayanıklı toprak agregatlarını artırarak toprak nem tutma kapasitesini dolaylı biçimde iyileştirdiği ve bu mekanizma üzerinden kuraklık stresi altında bitki büyümesini desteklediği bilinmektedir (Wu ve ark., 2008; 122). Ancak bu etkinin yalnızca fiziksel toprak iyileşmesiyle sınırlı olmadığı; fosfor başta olmak üzere mineral besin elementlerinin alımındaki artışın da büyüme üzerinde önemli bir katkısı olduğu vurgulanmaktadır. *Acacia nilotica* ve *Leucaena leucocephala* fideleri üzerinde yürütülen çalışmalarda, kuraklık uygulamasının hem toplam biyokütleyi hem de nodülasyon düzeyini önemli ölçüde azalttığı bildirilmiş; bu bulgu su stresinin simbiyotik ilişkiler üzerinde baskılayıcı bir etki oluşturduğunu göstermektedir (Michelsen & Rosendahl, 1990; 7).

Kuraklık stresi koşullarında VAM aşılması veya fosfor gübrelenmesiyle elde edilen iyileşmelerin bitki türüne göre farklılık gösterdiği ortaya konmuştur; bazı türlerin mikorizal simbiyozla daha güçlü yanıt verdiği, bazılarının ise sınırlı ölçüde yararlandığı gözlemlenmiştir. Bu farklılıkların kök morfolojisi, besin alım stratejileri ve mikorizal bağımlılık düzeyleriyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Tahat & Sijam, 2012; 125).

Toprak özellikleri —pH, kil oranı ve organik madde içeriği— mikorizal karbon sekestrasyonunun mikroçevresel belirleyicileri olarak öne çıkmaktadır. Nötr veya hafif alkali topraklarda mikorizal hif gelişimi genellikle daha verimli olmakta; asidik koşullar ise hem AMF hem de EMF için enzimatik aktiviteyi kısıtlayabilmektedir (Hawkins ve ark., 2023; R560). Mikorizal karbon akışları iklim değişkenlerine karşı oldukça duyarlı olup kuraklık, sıcaklık artışı ve besin azlığı bu akışları önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bazı arbusküler mikoriza türleri orta düzeydeki kuraklık koşullarında karbon akışını koruyabilirken aşırı sıcaklıklarda bu akışın azaldığı

bildirilmektedir. Güncel modelleme çalışmaları, mikorizal ağların iklim değişkenlerine verdiği yanıtın karbon döngüsündeki geri besleme mekanizmalarını etkileyebileceğini ortaya koymaktadır; bu nedenle mikoriza biyokütlesi ve tür çeşitliliğinin küresel karbon tahminlerinin güvenilirliğini artırmak açısından vazgeçilmez olduğu vurgulanmaktadır (Hawkins ve ark., 2023; R560).

## **Sonuçlar**

Arbuskler mikorizalar, bitkiden aldıkları fotosentetik karbonu toprakta uzun süre tutarak glomalın üretmektedir. Ektomikorizalar ise orman ekosistemlerinde zor ayrışan maddeleri dönüştürerek karbonu kalıcı havuzlara aktarır. Bu iki mikoriza türünün farklı stratejileri, ekosistemler arasındaki karbon sekestrasyonunu etkileyebilir. Ayrıca, mikorizal karbon akışının çevresel faktörlerle de etkilendiği belirtilmiştir. Mikorizal birlikteliklerin bitki gelişimini desteklemesinin ötesinde küresel karbon döngüsü üzerindeki işlevi, sürdürülebilir ekosistem yönetimi ve iklim değişikliğiyle mücadele açısından stratejik bir önem taşımaktadır. Gelecekteki araştırmaların; mikorizal çeşitliliğin korunması, mikoriza parametrelerinin iklim ve karbon modellerine entegrasyonu ile mikoriza temelli toprak yönetimi uygulamalarının geliştirilmesi üzerine yoğunlaşması büyük önem taşımaktadır.

## Kaynakça

Averill, C., Turner, B. L., & Finzi, A. C. (2014). Mycorrhiza mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage. *Nature*, 505(7484), 543-545. <https://doi.org/10.1038/nature12901>

Beidler, K. V., Huenupi, E., DeLancey, L. C., Maillard, F., Zhang, B., Persson, P., Kennedy, P. G., & Phillips, R. (2024). Necromass chemistry interacts with soil mineral and microbial properties to determine fungal carbon and nitrogen persistence in soils. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2024.06.27.600831>

Bhunja, G. S., Shit, P. K., Pourghasemi, H. R., & Edalat, M. (2019). Prediction of soil organic carbon and its mapping using regression analyses and remote sensing data in GIS and R. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, 429-450. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815226-3.00019-3>

Brundrett, M. C. (2009). Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis. *Plant and Soil*, 320, 37-77. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9877-9>

Buckeridge, K. M., Mason, K. E., McNamara, N. P., Ostle, N., Puissant, J., Goodall, T., Griffiths, R. I., Stott, A. W., & Whitaker, J. (2020). Environmental and microbial controls on microbial necromass recycling, an important precursor for soil carbon stabilization. *Communications Earth & Environment*, 1, 36. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00031-4>

Calderón, F. J., Schultz, D. J., & Paul, E. A. (2012). Carbon allocation, belowground transfers, and lipid turnover in a plant-microbial association. *Soil Science Society of America Journal*, 76, 1614-1623. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0440>

Clemmensen, K. E., Bahr, A., Ovaskainen, O., Dahlberg, A., Ekblad, A., Wallander, H., Stenlid, J., Finlay, R. D., Wardle, D. A., & Lindahl, B. D. (2013). Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. *Science*, 29; 339 (6127), 1615-1618. <https://doi.org/10.1126/science.1231923>

Courty, P.-E., Buee, M., Diedhiou, A. G., Frey-Klett, P., Le Tacon, F., Rineau, F., Turpault, M.-P., Uroz, S., & Garbaye, J. (2010). The role of ectomycorrhizal communities in forest ecosystem processes: New perspectives and emerging concepts. *Soil Biology & Biochemistry*, 42(5), 679-698. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.12.006>

Dearnaley, JDW. (2007). Further advances in orchid mycorrhizal research. *Mycorrhiza*, 17(6), 475-486. <https://doi.org/10.1007/s00572-007-0138-1>

Díaz, S., Hector, A., & Wardle, D. A. (2009). Biodiversity in forest carbon sequestration initiatives: not just a side benefit. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(1), 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2009.08.001>

Drigo, B., Pijl, A. S., Duyts, H., Kielak, A. M., Gamper, H. A., Houtekamer, M. J., Boschker, H. T., Bodelier, P. L., Whiteley, A. S., van Veen, J. A., & Kowalchuk, G. A. (2010). Shifting carbon flow from roots into associated microbial communities in response to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(24), 10938-10942. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912421107>

Fall, A. F., Nakabonge, G., Ssekandi, J., Founoune-Mboup, H., Apori, S. O., Ndiaye, A., Badji, A., & Ngom, K. (2022). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on soil fertility: contribution in the improvement of physical, chemical, and biological properties of the soil. *Frontiers in Fungal Biology*, 3, 723892. <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.723892>

Fernandez, C. W., & Kennedy, P. G. (2018). Melanization of mycorrhizal fungal necromass structures microbial decomposer communities. *Journal of Ecology*, 106(2), 468-479. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12920>

Finlay, R. D. (2008). Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany*, 59(5), 1115-1126. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern059>

Gou, X., Hu, Y., Ni, H., Wang, X., Qiu, L., Chang, X., Shao, M., Wei, G., & Wei, X. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate erosional soil nitrogen loss by regulating nitrogen cycling genes and enzymes in experimental agro-ecosystems. *Science of the Total Environment*, 906, 167425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167425>

Hawkins, H.-J., Cargill, R. I. M., Van Nuland, M. E., Hagen, S. C., Field, K. J., Sheldrake, M., Soudzilovskaia, N. A., & Kiers, E. T. (2023). Mycorrhizal mycelium as a global carbon pool. *Current Biology*, 33(11), R560-R573. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.02.027>

Huang, W., van Bodegom, P. M., Viskari, T., Liski, J., & Soudzilovskaia, N. A. (2022). Implementation of mycorrhizal mechanisms into soil carbon model improves the prediction of long-term processes of plant litter decomposition. *Biogeosciences*, 19(5), 1469-1490. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1469-2022>

Högberg, M. N., Briones, M. J. I., Keel, S. G., Metcalfe, D. B., Campbell, C., Midwood, A. J., Thornton, B., Hurry, V., Linder, S., Näsholm, T., & Högberg, P. (2010). Quantification of effects of season and nitrogen supply on tree below-ground carbon transfer to ectomycorrhizal fungi and other soil organisms in a boreal pine

forest. *New Phytologist*, 187(2), 485-493.  
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03274.x>

Jakobsen, I., Smith, S. E., & Smith, F. A. (2002). Function and diversity of arbuscular mycorrhizae in carbon and mineral nutrition. In M. G. A. V. D. Heijden, & I. R. Sanders (Eds.), *Mycorrhizal ecology* (pp. 75-92). Springer.

Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10, 423-436.  
[https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)

Johnson, D., Leake, J., R., & Read, D., J., (2002). Transfer of recent photosynthate into mycorrhizal mycelium of an upland grassland: short-term respiratory losses and accumulation of <sup>14</sup>C. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(10), 1521-1524.  
[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00126-8)

Leake, J., Johnson, D., Donnelly, D., Muckle, G., Boddy, L., & Read, D. (2004). Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystem functioning. *Canadian Journal of Botany*, 82(8), 1016-1045. <https://doi.org/10.1139/b04-060>

Li, S., Yang, W., Hu, J., Guo, M., Li, Y., Wang, Y., Hu, M., Zhang, Y., Du, D., & Zhu, X. (2024). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on organic carbon allocation, sequestration, and decomposition in black soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 104(4), 456-468. <https://doi.org/10.1139/cjss-2024-0048>

Li, X., Zhao, R., Li, D., Wang, G., Bei, S., Ju, X., An, R., Li, L., Kuyper, T. W., Christie, P., Bender, F. S., Veen, C., van der Heijden, M. G. A., van der Putten, W. H., Zhang, F., Butterbach-Bahl, K., & Zhang, J. (2023). Mycorrhiza-mediated recruitment of

complete denitrifying *Pseudomonas* reduces N<sub>2</sub>O emissions from soil. *Microbiome*, 11, 45. <https://doi.org/10.1186/s40168-023-01466-5>

Liu, R., He, Y., Zhou, G., Shao, J., Zhou, L., Zhou, H., Li, N., Song, B., Liang, C., Yan, E., Chen, X., Wang, X., Wang, M., Bai, S. H., Zhou, X., & Phillips, R. P. (2021). Mycorrhizal effects on decomposition and soil CO<sub>2</sub> flux depend on changes in nitrogen availability during forest succession. *Journal of Ecology*, 109, 3929-3943. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13770>

Michelsen, A., & Rosendahl, S. (1990). The effect of VA mycorrhizal fungi, phosphorus and drought stress on the growth of *Acacia nilotica* and *Leucaena leucocephala* seedlings. *Plant and Soil*, 124(1), 7-13. <http://www.jstor.org/stable/42938480>

Nehls, U., Göhringer, F., Wittulsky, S., & Dietz, S. (2010). Fungal carbohydrate support in the ectomycorrhizal symbiosis: a review. *Plant Biology*, 12(2), 292-301. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2009.00312.x>

Parihar, M., Rakshit, A., Meena, V. S., Gupta, V. K., Rana, K., Choudhary, M., Tiwari, G., Mishra, P. K., Pattanayak, A., Bisht, J. K., Jatav, S. S., Khatri, P., & Jatav, H. S. (2020). The potential of arbuscular mycorrhizal fungi in C cycling: a review. *Archives of Microbiology*, 202(7), 1581-1596. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01915-x>

Pauwels, R., Graefe, J., & Bitterlich, M. (2023). An arbuscular mycorrhizal fungus alters soil water retention and hydraulic conductivity in a soil texture specific way. *Mycorrhiza*, 33, 165-179. <https://doi.org/10.1007/s00572-023-01106-8>

Porcel, R., Aroca, R., Azcon, R., & Ruiz-Lozano, J. M. (2016). Regulation of cation transporter genes by the arbuscular mycorrhizal symbiosis in rice plants subjected to salinity suggests

improved salt tolerance due to reduced Na<sup>+</sup> root-to-shoot distribution. *Mycorrhiza*, 26(7), 673-684.  
<https://doi.org/10.1007/s00572-016-0704-5>

Redecker, D., Kodner, R., & Graham, L. E. (2000). Glomalean fungi from the Ordovician. *Science*, 289, 1920-1921.  
<https://doi.org/10.1126/science.289.5486.1920>

Ren, C., Liu, K., Dou, P., Li, J., & Wang, K. (2022). The changes in soil microorganisms and soil chemical properties affect the heterogeneity and stability of soil aggregates before and after grassland conversion. *Agriculture*, 12(2), 307.  
<https://doi.org/10.3390/agriculture12020307>

Rillig, M. C. (2004). Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecology Letters*, 7(8), 740-754.  
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00620.x>

Rillig, M. C., Aguilar-Trigueros, C. A., Bergmann, J., Verbruggen, E., Veresoglou, S. D., & Lehmann, A. (2015). Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation. *New Phytologist*, 205(4), 1385-1388.  
<https://doi.org/10.1111/nph.13045>

Shukla, S., Didwania, N., & Choudhary, R. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF): a pathway to sustainable soil health, carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 24, 22.  
<https://doi.org/10.1007/s44447-025-00023-w>

Singh, A. K., Chen, C., Zhu, X., Yang, B., Khan, M. N., Zakari, S., Jiang, X. J., del Mar Alguacil, M., & Liu, W. (2024). Unraveling the impact of global change on glomalin and implications for soil carbon storage in terrestrial ecosystems. *Resources, Environment and Sustainability*, 18, 100174.  
<https://doi.org/10.1016/j.resenv.2024.100174>

Six, J., Frey, S., Thiet, R., & Batten, K.M. (2006). Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 555-569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>

Smith, S. E., & Read, D. J. (2010). *Mycorrhizal Symbiosis* (3. baskı). Academic Press.

Subramanian, K. S., Vivek, P. N., Balakrishnan, N., Nandakumar, N. B., & Rajkishore, S. K. (2019). Effects of arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizoglyphus intraradices* on active and passive pools of carbon in long-term soil fertility gradients of maize based cropping system. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(8), 549-565. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1512100>

Tahat, M. M., & Sijam, K. (2012). Mycorrhizal fungi and abiotic environmental conditions relationship. *Research Journal of Environmental Sciences*. Volume: 6 | Issue: 4 | Page No.: 125-133. DOI: [10.3923/rjes.2012.125.133](https://doi.org/10.3923/rjes.2012.125.133)

Tao, J., & Liu, X. (2024). Does arbuscular mycorrhizal fungi inoculation influence soil carbon sequestration? *Biology and Fertility of Soils*, 60, 213-225. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01793-1>

Terrer, C., Jackson, R. B., Prentice, I. C., Keenan, T. F., Kaiser, C., Vicca, S., Fisher, J. B., Reich, P. B., Stocker, B. D., Hungate, B. A., Peñuelas, J., McCallum, I., Soudzilovskaia, N. A., Cernusak, L. A., Talhelm, A. F., Van Sundert, K., Piao, S., Newton, P. C. D., Hovenden, M. J., Dana M. Blumenthal Yi Y. Liu, Christoph Müller, Klaus Winter, Christopher B. Field, Wolfgang Viechtbauer, Caspar J. Van Lissa, Marcel R. Hoosbeek, Makoto Watanabe, Takayoshi Koike, Victor O. Leshyk, H.W. Polley, Franklin, O. (2019). Nitrogen and phosphorus constrain the CO<sub>2</sub> fertilization of

global plant biomass. *Nature Climate Change*, 9, 684-689.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0545-2>

Terrer, C., Phillips, R. P., Hungate, B. A., Rosende, J., Pett-Ridge, J., Craig, M. E., van Groenigen, K. J., Keenan, T. F., Sulman, B. N., Stocker, B. D., Reich, P. B., Pellegrini, A. F. A., Pendall, E., Zhang, H., Evans, R. D., Carrillo, Y., Fisher, J. B., Van Sundert, K., Vicca, S., & Jackson, R. B. (2021). A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO<sub>2</sub>. *Nature*, 591(7851), 599-603.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03306-8>

Treseder, K. K. (2004). A meta-analysis of mycorrhizal responses to nitrogen, phosphorus, and atmospheric CO<sub>2</sub> in field studies. *New Phytologist*, 164(2), 347-355.  
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01159.x>

Ullah, S., Muhammad, B., Amin, R., Abbas, H., & Muneer, M. A. (2019). Sensitivity of arbuscular mycorrhizal fungi in old-growth forests: direct effect on growth and soil carbon storage. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(6), 13749-13758.  
[https://doi.org/10.15666/aer/1706\\_1374913758](https://doi.org/10.15666/aer/1706_1374913758)

Umer, M., Anwar, N., Mubeen, M., Li, Y., Ali, A., Alshaharni, M. O., & Liu, P. (2025). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth and disease management for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1616273.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1616273>

Welc, M., Ravnskov, S., Kieliszewska-Rokicka, B., & Larsen, J. (2010). Suppression of other soil microorganisms by mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi in root-free soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9), 1534-1540.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.05.024>

Wu, Q. S., Xia, X. R., & Zou, Y. N. (2008). Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular

mycorrhizal fungi under drought stress. *European Journal of Soil Biology*, 44, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.10.001>

Wu, S., Fu, W., Rillig, M.C., Chen, B., Zhu, Y.G., & Huang, L. (2024). Soil organic matter dynamics mediated by arbuscular mycorrhizal fungi — an updated conceptual framework. *New Phytologist*. 242(4):1417-1425. <https://doi.org/10.1111/nph.19178>

Zhang, H., Liu, T., Wang, Y., & Tang, M. (2019). Exogenous arbuscular mycorrhizal fungi increase soil organic carbon and change microbial community in poplar rhizosphere. *Plant, Soil and Environment*, 65(3), 152-158. <https://doi.org/10.17221/2/2019-PSE>

Zhou, G., Wang, M., Zhu, H., Wang, J., & Zhang, S. (2025). Effects of organic carbon, inorganic phosphorus, and phosphorus-solubilizing bacteria on maize growth, nutrient uptake, and rhizosphere phosphorus availability. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1644448. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1644448>

Zhou, J., Bilyera, N., Guillaume, T., Yang, H., Li, F. M., & Shi, L. (2024). Microbial necromass and glycoproteins for determining soil carbon formation under arbuscular mycorrhiza symbiosis. *Science of the Total Environment*, 955, 176732. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176732>

Zhu, Y.G., & Miller, R. M. (2003). Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant systems. *Trends in Plant Science*, 8, 407-409. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(03\)00184-5](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(03)00184-5)

