

Lamine malzemelerin (Lvl ve Glulam) liflere paralel basınç ve dinamik eğilme dirençleri üzerine nanoteknolojik ürünlerin etkisi

Mehmet Erdal Kara^{a,*} , Ayhan Özçifçi^b 

Öz: Bu çalışmada, lamine malzemelerin bazı mekanik özellikleri üzerine nano ürünlerle modifiye edilmiş reçinelerinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, Uludağ göknarı (*Abies bornmülleriana* Mattf.) ve Titrek kavak (*Populus tremula*) ağaç türlerinden hazırlanan deney örnekleri %2 ve %4 oranında nano ürünlerle (SiO₂ ve TiO₂) modifiye edilen FF ve MUF tutkalları ile yüksek frekanslı presde yapıştırılarak çok katmanlı LVL (laminated veneer lumber) ve yapısal olmayan GLULAM (Glued laminated material) lamine malzemeler üretilmiştir. Elde edilen lamine malzemeler TS EN 408+A1'e göre liflere paralel yönde basınç direnci ve TS 2477'ye göre dinamik eğilme (şok) direnci testleri uygulanmıştır. Test sonuçları kontrol örnekleri ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Sonuçlar gruplar içi kontrol örnekleri ile karşılaştırıldığında nano ürünlerle modifiye edilen FF ve MUF reçinelerin lamine malzemelerin mekanik özellikleri üzerine olumlu yönde etkisi olduğu anlaşılmıştır. Buna göre en iyi sonuçlara; liflere paralel basınç direncinde %22,96 artış ile %4 TiO₂ ile modifiye edilen MUF tutkalıyla yapıştırılan kavak-LVL deney örneklerinde ulaşılmıştır. Dinamik eğilme direncinde ise %16,66 artışla %4 SiO₂ nano ürün ile modifiye edilen ve MUF tutkalı ile yapıştırılan göknar-LVL numunelerinde tespit edilmiştir. Araştırma sonunda nano ürünlerle güçlendirilmiş MUF reçineleri ile yapıştırılan LVL'nin Ahşap malzemelere alternatif olarak kullanılabileceği tavsiye edilmiştir.

Anahtar kelimeler: GLULAM, Lamine malzeme, LVL, Mekanik özellikler, Nanoteknolojik ürün, Tutkal

Effect of nanotechnological products on compression parallel to the fibers and dynamic bending strengths of laminated materials (Lvl and Glulam)

Abstract: In this study, the effect of resins modified with nanoproducts on some mechanical properties of laminated materials was investigated. For this purpose, LVL and unstructured GLULAM laminated materials were obtained by gluing test specimens prepared from Uludağ fir (*Abies bornmülleriana* Mattf.) and aspen (*Populus tremula*) tree species with FF and MUF glues modified with 2% and 4% nanoproducts (SiO₂ and TiO₂) in high frequency press. The laminated materials were tested for compressive strength in the direction parallel to the fibers according to TS EN 408+A1 and dynamic bending (shock) resistance according to TS 2477. The test results were compared and analyzed with the control samples. When the test results were compared with the control samples within the groups, it was understood that FF and MUF resins modified with nanoproducts had a significant positive effect on the mechanical properties of laminated materials. Accordingly, the optimum values were observed in the poplar-LVL test samples bonded with MUF glue modified with 4% TiO₂ nanoproducts with 22.96% increase in compressive strength parallel to the fibers. An increase of 16.66% in dynamic flexural strength was observed in fir-LVL specimens modified with 4% SiO₂ nanoproducts and bonded with MUF glue. At the end of the research, it was recommended that LVL bonded with MUF resins reinforced with nanoproducts can be used as an alternative to wood materials.

Keywords: GLULAM, Laminated material, LVL, Mechanical properties, Nanotechnology product, Glue

1. Giriş

Günümüzde orman kaynaklarının korunması, geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için alınan önlemler halen istenilen bir düzeye ulaşamadığı görülmektedir. Üstelik her yıl orman yangınlarının da artması bu konunun olumsuz yanlarıdır. Bu nedenle orman ürünlerinin kullanımında ahşap türevi kompozitler ile nanoteknolojik ürünlerin kullanımı önem arz etmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte nanoteknoloji alanındaki yenilikler farklı malzemelerin üretimine imkân sağlamaktadır. Son yıllarda Avrupa'da ahşap kompozitlerin yaygın kullanılmaya başlaması lamine ahşabın (CLT) ortaya çıkmasıyla (Brandner vd., 2016), modern ahşap yapılar için mühendislik ahşap ürünü

(EWP)'de tercih edildiği bildirilmektedir. Ahşap kompozitlerin boyutsal kararlılığı ve çift yönlü mukavemete sahip olması yapılar için iç ve dış mekan bileşenleri (döşemeler, duvarlar, çatılar vb.) olarak kullanımına imkân sağlamaktadır (O'Ceallaigh ve Harte, 2019). Benzer çalışmalar incelendiğinde bu kompozitler de kendi içinde çapraz kullanılabilmektedir (Yin vd., 2024; Wang vd., 2015; Wang vd., 2017). Li ve arkadaşları masif ahşap ve lamine şeritli keresteyi (LSL)/lamine kaplama keresteyi (LVL) (Şekil 1) birleştirerek elde edilen hibrit lamine ahşap (HCLT)'in, LSL/LVL'nin masif ahşap yerine enine katmanlar halinde birleştirildiğinde geleneksel CLT'den daha yüksek bir eğilme performansı elde edebileceğini

✉ ^a Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bahçesaray Mahallesi, 68100, Aksaray, Türkiye

@ ^{*} **Corresponding author** (İletişim yazarı): erdal.kara7581@gmail.com

✓ **Received** (Geliş tarihi): 05.04.2025, **Accepted** (Kabul tarihi): 01.09.2025



Citation (Atıf): Kara, M.E., Özçifçi, A., 2025. Lamine malzemelerin (Lvl ve Glulam) liflere paralel basınç ve dinamik eğilme dirençleri üzerine nanoteknolojik ürünlerin etkisi. Turkish Journal of Forestry, 26(3): 405-412.
DOI: [10.18182/tjf.1670117](https://doi.org/10.18182/tjf.1670117)

önermektedir (Li vd., 2020; Liang vd., 2022; Song vd., 2021; Xu vd., 2021).

Çapraz kompozit konfigürasyonları kullanıldığında, bambu birleşimler (HCLT-hibrit çapraz lamine kereste), LVL katmanlı (HCLT-LVL kompozit) birleşimlere göre daha yüksek yük taşıma kapasitesi ve mekanik direnç gösterdiği belirtilmektedir (Yin vd., 2025). Bu bilgilerin doğrultusunda ahşap kompozitler, endüstriyel yapıstırıcılar ve nanoteknolojik ürünler ile birlikte kullanımıyla daha da mukavemetli kompozitlerin günümüzde ve gelecekte bu alanda yeni bir malzeme oluşturacağı düşünülmektedir.

Günümüzde endüstriyel tutkallara nanoteknolojik ürün takviyesi ile yeni yapıstırıcıların geliştirilmesi ve her alanda kullanım imkânının araştırılması malzeme bilimi ve mühendisliğin en çok araştırılan konuları arasında yer almaktadır. Bu alanda literatür incelendiğinde, nanoteknolojik ürünlerle odun kompozitlerinin birleştirilmesine yönelik polimer esaslı yapıstırıcıların modifiye edilerek kullanılması ile sektörde daha fonksiyonel uygulamaların yapılabileceği belirtilmektedir (Candan, 2012). Salari vd. (2012) üre formaldehit (UF) tutkalı içerisine %0, %1, %3 ve %5 oranında nanokil ilave edilerek kavak ağacından elde ettikleri lamine malzemelerde %5 nanokil kullanımı ile çekme direncinde %50, eğilme direncinde %15 ve elastikiyet modülünde %10 artış bulmuşlar. Kaymakçı, (2015) %0, %1 ve %3 oranında SiO₂, Al₂O₃ ve ZnO nano ürünlerle güçlendirdiği UF ve MUF tutkalı ile yapıstırılan ahşap sandviç panellerde %1 SiO₂ ve Al₂O₃ nano ürün kullanılmasıyla çekme direnci, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerini artırdığını belirtmiştir. Atar vd. (2016) MF tutkalı yapıstırılan kayın ve kavak kaplamalarından üretilen lamine malzemelerin (LVL) eğilme direncini test etmişler ve sonuçta elastikiyet modülü ve liflere paralel basınç direncinde en yüksek eğilme direncinin kayın, en düşük ise kavak-LVL'de olduğunu belirtmişlerdir. Nano ürünlerin (TiO₂, SiO₂, Al₂O₃, ZnO vb.) orman ürünleri endüstrisinde kullanımı oldukça yeni ve popüler bir konudur (Boumer vd., 2022). Bu nedenle literatürde nano boyutlu ürünlerle yapısal amaçlı lamine malzeme üretim çalışmalarının sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu literatür bilgileri ışığında; bu çalışmada TiO₂ ve SiO₂ ile modifiye edilen FF ve MUF tutkalları ile yapıstırılan Glulam ve çok katmanlı (kontrplak benzeri) LVL malzemelerin bazı mekanik özellikleri araştırılmıştır. Sonuçta nano ürünlerin ahşap kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Materyal

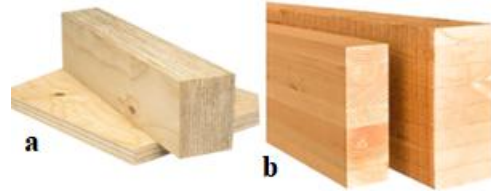
Deney örneklerinin hazırlanmasında ağaç malzeme olarak kullanılan Titrek kavak (*Populus tremula* L.) ve Uludağ göknarı (*Abies bornmülleriana* Mattf.) Kastamonu/Taşköprü bölgesinden temin edilmiştir.

Deney örneklerinin yapıstırılmasında kullanılan melamin üre formaldehit (MUF-P03) ve fenol formaldehit (FF-Polifen 47) reçineleri Polisan Kimya A.Ş.'den temin edilmiştir. Metin içerisinde iki ahşap malzeme kısaca kavak ve göknar, tutkallar da FF ve MUF olarak kullanılmıştır. Ahşap türlerinin özellikleri genel, kitabi olarak bilindiği için sadece tutkal türlerinin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Hammadde ve deney örneklerinin hazırlanması: Kavak ve göknar odunlarının diri odunlarından kesme yöntemiyle çok katmanlı LVL için 800x1000x1,3 mm kaba ölçülerinde, Glulam için 100x1000x5,5 mm ölçülerinde hazırlanıp taslaklar halinde kurutulmuştur. Örnekler daha sonra 20±2 °C ve 65±5 bağıl nemde değişmez ağırlığa gelinceye kadar yaklaşık bir hafta bekletildikten sonra 80 kum zımpara bantı ile İtalyan menşei EMC Explorer 2RK marka 2010 model kalibre zımpara makinesi ile zımparalanmıştır.

Tutkalların modifiye edilmesinde nanoteknolojik ürün olarak titanyum di-oksit (TiO₂) ve silisyum di-oksit (SiO₂) kullanılmış olup, MKnano firmasından satın alınmıştır. Nano ürünlerin karakteristik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Nano ürün ve tutkal: Tutkalların direncini artırıcı madde olarak, SiO₂-TiO₂ nano ürünler %2 ve %4 oranında FF ve MUF tutkallarına steril ortamda 5 dakika boyunca 600 rpm'de çalışan laboratuvar tipi el mikseri ile karıştırılmıştır. Daha sonra %0,05 hassasiyette dijital terazide tartılarak m²'ye 200 g olacak şekilde fırça ile sürülmüştür.



Şekil 1. LVL (a) ve GLULAM (b) malzemelerden örnekler (Ayanleye vd., 2022)

Figure 1. Examples of LVL (left) and GLULAM (right) materials (Ayanleye vd., 2022)

Çizelge 1. Tutkalların karakteristik özellikleri

Table 1. Characteristic properties of adhesives

Tutkallar	Katı madde (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite (cP)	pH	Mol oranı (Mr)	Akma zamanı (sn)	Jel süresi (sn)
Melamin üre formaldehit (MUF-P03)	54-56	1,23-1,24	100-250	8,5-9,5	1,15	20-40	70-110
Fenol formaldehit (FF-Polifen 47)	46-48	1,20-1,22	300-600	11-13		50-90	600-1200

Çizelge 2. Nano ürünlerin karakteristik özellikleri

Table 2. Characteristic properties of nanoproducts

Nano ürünler	Görünüş	Yoğunluk (g/cm ³)	Saflık (%)	Erime noktası (°C)	Yüzey alanı (m ² /g)	Parça boyutu (nm)
Titanyum di-oksit (TiO ₂)	Beyaz toz	3,5-4,2	280	1830	150	50
Silisyum di-oksit (SiO ₂)	Gri toz	2,34	75	1420	650	15

Yüksek frekanslı presler: Ahşap kompozit malzeme üretimi için hazırlanan kaplama ve tutkalların presleme işlemi SONAR marka yüksek frekanslı preslerde yapılmıştır. Burada; çok katmanlı kompozit (LVL ve GLULAM) malzemelerin yapıştırılması işlemi alüminyum kaplı plakaların anot (+) katot (-) kutupları arasında oluşan manyetik alan etkisiyle gerçekleşmiştir. Oluşturulan ısı sayesinde polimerlerin reaksiyonu daha hızlı gerçekleşir ve sonucta presleme süresi kısaltılmış olur. Sistemin çalışması yüksek frekanslı preste elektron tüpünün salınımı yoluyla manyetik alan enerjisi yayılır ve ısı iletimi işlenmiş küçük parçalar üzerinde hareket eder. Yüksek frekanslı enerji malzeme moleküllerine nüfuz eder ve ısınan yapıştırıcı reaksiyonu tamamlanır. Sonuçta malzemenin molekülleri hızla polarize olur ve deney örneklerinin yapışması gerçekleşmiş olur.

Deney örneklerinin üretimi: Deney örneklerinin hazırlanmasında kaplama papeller LVL için 17 kat (1,3x17=22,1 mm), yapısal olmayan GLULAM için 4 kat (5,5x4=22 mm) hazırlanmıştır ASTM D3737-18e1 (2023). Presleme işlemi için boyuna yönde üst üste olacak şekilde hazırlanan deney örnekleri 130±5 °C sıcaklık ve 0,55 N/mm² basınçta LVL için 3 dakika, yapısal olmayan GLULAM için 6 dakika pres sürelerinde preslenmiştir. Metin içerisinde örnekler bu GLULAM ve LVL olarak geçmektedir.

2.2. Yöntem

Deney panelleri 20±2°C ve 65±5 bağıl nemde kondisyonlanmış ve her grup için 10 değişken deney numunesi hazırlanmıştır. Çok katmanlı LVL ve yapısal olmayan GLULAM malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 3'te belirtilen standartlara uygun olarak SFC Entegre Orman Ürünleri Sanayi ve Ticaret A.Ş ve Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mobilya ve Dekorasyon Bölümü laboratuvarında test edilmiştir.

Çizelge 3. Lamine malzeme örnekleri üzerinde uygulanan testler ve karşılık gelen standartlar

Table 3. Tests performed on laminate material samples and corresponding standards

Deney türleri	Birim	Örnek en-boy-kalınlık (mm)	Standart no
Yoğunluk tayini	g/cm ³	20x20x22	TS EN 323 (1999)
Liflere paralel basınç direnci	N/mm ²	20x30x22	TS EN 408+A1 (2015)
Dinamik eğilme (Şok) direnci	kg.m/cm ²	20x300x22	TS 2477 (1976)



Şekil 2. Liflere paralel basınç direnci testi
Figure 2. Compressive strength test parallel to the fibers

İstatistiksel analizlerde SPSS 16 istatistiksel paket programı kullanılmıştır. Faktörlerin etkinliğini belirlemek için çok yönlü varyans analizi (MANOVA), faktörler arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak önemli olup olmadığı ise %95 güvenle (DUNCAN) testi ile belirlenmiştir.

Tam kuru yoğunluğun (Do) hesaplanmasında Formül 1 kullanılmıştır.

$$D_0 = \frac{M_0}{V_0} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (1)$$

Burada;

Do = Tam kuru yoğunluk (g/cm³)

Mo = Tam kuru örnek ağırlığı (g)

Vo = Tam kuru örnek hacmi (cm³)

2.2.1. Liflere paralel basınç direnci

Liflere paralel yönde basınç direnci (LPBD) TS EN 408+A1 (2015) sayılı standarda uygun olarak Üversal test cihazında yapılmıştır. 20x20x30 mm ebatlarında hazırlanmış olan deney numuneleri en kesitine tam ortadan ve numuneleri 1,5-2 dakika içinde ezecek şekilde sabit bir yükleme hızı ayarlanmıştır. Deneyden önce, kuvvetin uygulandığı enine kesit alanı 0,01 mm duyarlılıkta kompasla (axb) ölçülüp uygulanan kuvvet örnek kırılınca kadar devam ettirilmiş ve kırılma anındaki yük ve buna ilişkin grafik verileri test cihazına entegre bilgisayar sistemine kaydedilmiştir. Liflere paralel basınç direnci testi Şekil 2'de gösterilmiştir.

Liflere paralel basınç direnci (σ_w) Formül 2'ye göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_w = \frac{P_{\max}}{a \cdot b} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

Burada;

σ_w = Liflere paralel basınç direnci (N/mm²)

P_{max} = Kırılma anındaki en büyük yük (N)

a ve b = Deney parçasının enine kesit alanı (mm²)

2.2.2. Dinamik eğilme (Şok) Direnci ($kg.m/cm^2$)

Dinamik eğilme şok direnci Ahşap malzemenin ani tesir eden kuvvetlere karşı koyma gücüdür. TS 2477 (1976) standardında belirlenen esaslara uyularak pandüllü çekiç kullanılarak yapılmıştır. 20x300x20 mm ebatlarında hazırlanan deney numuneleri radyal yönü genişlik, teğet yönü de kalınlık alınmak suretiyle boyutları örneğin ortasından $\pm 0,01$ mm duyarlılıkta kumpasla ölçülmüştür. Örnekler, darbenin radyal yüzeye uygulanacağı şekilde test düzeneğine yerleştirilmiştir. Dinamik eğilme direnci testi Şekil 3’de gösterilmiştir.

Her deney parçasının dinamik eğilme direnci (sDE) aşağıdaki Formül 3 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$sDE = \frac{W}{b \cdot h} (kgm/cm^2) \quad (3)$$



Şekil 3. TS 2477 (1976) standardına göre pandüllü çekiçle dinamik eğilme (şok) direnci test düzeneği
Figure 3. Dynamic bending (shock) resistance test setup with pendulum hammer according to TS 2477 (1976) standard

Çizelge 4. Kompozit malzemelerin ortalama yoğunluk değerleri (g/cm^3)

Table 4. Average density values of composite materials (g/cm^3)

Ahşap türü	Gökmar				Kavak			
Kompozit malzeme	GLULAM		LVL		GLULAM		LVL	
Tutkal	FF	MUF	FF	MUF	FF	MUF	FF	MUF
Kontrol	0,407	0,414	0,550	0,543	0,407	0,387	0,592	0,580
TiO ₂ -%2	0,418	0,422	0,552	0,612	0,417	0,408	0,585	0,570
TiO ₂ -%4	0,412	0,421	0,560	0,602	0,413	0,397	0,557	0,607
SiO ₂ -%2	0,411	0,425	0,548	0,553	0,428	0,400	0,577	0,572
SiO ₂ -%4	0,426	0,425	0,542	0,560	0,414	0,402	0,583	0,558

Çizelge 5. Deney örneklerinden elde edilen ortalama basınç direnci değerleri

Table 5. Average compressive strength values obtained from test samples

Ahşap türü	Gökmar	Ortalama (N/mm ²)	p≤0,05
Kompozit malzeme	Glulam	43,916	0,000
	LVL	54,027	
Tutkal	FF	46,52	0,000
	MUF	51,423	
Nano ürün	Kontrol	47,748 (a)	
	TiO ₂ -%2	48,077 (ab)	
	TiO ₂ -%4	50,143 (bc)	0,022
	SiO ₂ -%2	48,483 (abc)	
	SiO ₂ -%4	50,406 (c)	

Burada;

W = Kırılma anında harcanan iş (kgm)

b = Örneğin genişliği (cm)

h = Örneğin yüksekliği (cm)

3. Bulgular

3.1. Tam kuru yoğunluk

Yapısal olmayan GLULAM ve LVL’lerin yoğunluklarına ait ortalama değerler Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 4’e göre kompozit malzemelerde en yüksek yoğunluk değeri (0,612 g/cm^3) %2 karışımı TiO₂ MUF tutkalında gökmar türü LVL örneklerde tespit edilmiştir. Bu durumda LVL örneklerde katman sayısının fazla olmasına bağlı olarak kompozitin daha fazla tutkal içermesi de (%12,7) yoğunluk artışına sebep olmuş olabilir.



3.2. Liflere paralel basınç direnci

Faktör çeşitlerine göre deney örneklerinden elde edilen ortalama basınç direnci değerleri Çizelge 5’de verilmiştir.

Çizelge 5’e göre liflere paralel basınç direnci üzerine ahşap malzeme türleri arasında istatistiksel olarak önemli bir değişken bulunmamıştır. Ancak yinede, kompozit malzeme, tutkal ve nano ürünler arasında farklılıkların olduğu görülmüş olup tüm sonuçlara Multi Variance Analyses: çoklu varyans analizi (MANOVA) testi uygulanmış ve sonuçları Çizelge 6’da verilmiştir.

MANOVA sonuçlarına göre lamine malzemelerin liflere paralel basınç direnci değerleri ahşap türü, tutkal çeşidi ve nano ürün maddeleri bakımından istatistiksel olarak ($p \leq 0,05$) önemli değişkenler görülmüştür. Bu veriler arasındaki önem derecelerini belirlemek için uygulanan Duncan testi sonuçları ise Çizelge 7’de gösterilmiştir.

Çizelge 6. Liflere paralel basınç direnci çoklu varyans analizi sonuçları

Table 6. Results of multiple variance analysis of compressive strength parallel to the fibers

Varyasyon kaynağı	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F Hesap	P<0,05
Düzeltilmiş model	21593,730 ^a	39	553,685	98,985	0,000
Kesişim	1151136,810	1	1151136,810	205794,110	0,000
Ahşap türü	164,093	1	164,093	29,336	0,000
Lamine malzeme	12266,969	1	12266,969	2193,023	0,000
Tutkal	2884,190	1	2884,190	515,620	0,000
Nano ürün	572,897	4	143,224	25,605	0,000
Ahşap türü*Lamine malzeme	435,388	1	435,388	77,836	0,000
Ahşap türü*Tutkal	67,838	1	67,838	12,128	0,001
Ahşap türü*Nano ürün	647,066	4	161,766	28,920	0,000
Lamine malzeme*Tutkal	2310,501	1	2310,501	413,059	0,000
Lamine malzeme*Nano ürün	308,404	4	77,101	13,784	0,000
Tutkal*Nano ürün	402,944	4	100,736	18,009	0,000
Ahşap türü*Lamine malzeme* Tutkal	61,111	1	61,111	10,925	0,001
Ahşap türü*Lamine malzeme*Nano ürün	654,335	4	163,584	29,245	0,000
Ahşap türü * Tutkal * Nano ürün	126,932	4	31,733	5,673	0,000
Lamine malzeme*Tutkal*Nano ürün	355,045	4	88,761	15,868	0,000
Ahşap türü*L. Malz.*Tutkal*Nano ürün	336,018	4	84,005	15,018	0,000
Hata	2461,199	440	5,594		
Toplam	1175191,74	480			
Düzeltilmiş toplam	24054,929	479			

a. R² = 0,898 (Düzeltilmiş R²= 0,889)

Çizelge 7. Liflere paralel basınç direncine ait ortalama değerler

Table 7. Average values of compressive strength parallel to the fibers

Ağaç türü	Lamine malzeme	Tutkal	Nano	Ortalama (N/mm ²)	N	Varyasyon katsayısı	Homojenlik grubu
Gökmar	Glulam	FF	Kontrol	45,14	10	2,9	e-i
			TiO ₂ -%2	40,53	10	3,6	a
			TiO ₂ -%4	41,60	10	2	ab
			SiO ₂ -%2	45,31	10	5	e-i
			SiO ₂ -%4	47,65	10	4,8	j-l
		MUF	Kontrol	44,92	10	6,1	e-i
			TiO ₂ -%2	42,36	10	5,4	a-d
			TiO ₂ -%4	42,09	10	4,2	a-c
			SiO ₂ -%2	45,10	10	4,7	e-i
			SiO ₂ -%4	48,15	10	2,9	kl
	LVL	FF	Kontrol	48,06	10	6,1	kl
			TiO ₂ -%2	46,93	10	4,6	i-l
			TiO ₂ -%4	49,04	10	4,5	lm
			SiO ₂ -%2	46,60	10	2,8	h-k
			SiO ₂ -%4	52,25	10	5,1	n-p
		MUF	Kontrol	58,81	10	4,6	rs
			TiO ₂ -%2	57,16	10	5,8	r
			TiO ₂ -%4	61,31	10	3,8	tu
			SiO ₂ -%2	51,55	10	4	no
			SiO ₂ -%4	53,19	10	5,3	op
	Kavak	FF	Kontrol	40,3	10	2,9	a
			TiO ₂ -%2	41,71	10	3,5	ab
			TiO ₂ -%4	46,50	10	9,9	g-k
			SiO ₂ -%2	43,30	10	4	b-e
			SiO ₂ -%4	44,56	10	3,5	e-h
		MUF	Kontrol	43,33	10	2,8	b-e
			TiO ₂ -%2	44,33	10	5	d-g
			TiO ₂ -%4	45,64	10	7,2	f-j
			SiO ₂ -%2	41,64	10	3,7	ab
			SiO ₂ -%4	44,19	10	4,6	c-f
	LVL	FF	Kontrol	47,12	10	6	i-l
			TiO ₂ -%2	51,30	10	4,7	no
			TiO ₂ -%4	48,20	10	3,6	kl
			SiO ₂ -%2	53,68	10	4	p
			SiO ₂ -%4	50,62	10	5	mn
		MUF	Kontrol	54,31	10	3,3	p
			TiO ₂ -%2	60,28	10	3,4	st
			TiO ₂ -%4	66,78	10	3,2	v
			SiO ₂ -%2	62,63	10	5,5	u
			SiO ₂ -%4	62,65	10	6,9	u

Çizelge 7’de lamine malzemelerin liflere paralel basınç direnci değerleri varyans analizi ile karşılaştırılmış ve gruplar arasında ahşap malzeme türü hariç, istatistiksel olarak önemli farklılıklar bulunmuştur. Araştırma sonunda tutkal türü ve nano ürün kullanım oranının kompozit malzemelerin liflere paralel basınç direnci üzerine olumlu yönde belirgin etkisi görülmüştür. Test sonuçları grup içi kontrol örnekleri ile karşılaştırıldığında en yüksek basınç direnci değeri kavak-LVL- MUF-%4 TiO₂ grubu örneklerinde (66,78 N/mm²), en düşük kavak-GLULAM – FF- kontrol örneklerinde (40,30 N/mm²) bulunmuştur. Elde edilen bulgular literatürde yapılan çalışmaların sonuçlarıyla benzerlik göstermiştir.

Liflere paralel basınç direnci değeri kompozit malzeme türü bakımından en yüksek LVL deney örneklerinde gerçekleşmesi katman sayısının fazlalığından kaynaklanabilir. Ayrıca bu durum nano ürün ilavesi ile yüzey alanı artan tutkalın sıcak presleme aşamasında kaplama tabakaları arasında daha iyi bağ yapması sonucu basınç direncinin arttığı şeklinde de yorumlanabilir. Elde edilen bulguların literatürdeki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir. Atar vd., (2016).

3.3. Dinamik eğilme (Şok) direnci (kg.m/cm²)

Malzeme türlerine göre deney örneklerinin ortalama dinamik eğilme direnci değerleri Çizelge 8’de verilmiştir.

Çizelge 8’de dinamik eğilme direnci üzerine ahşap türü ve lamine malzeme olarak Gökmar-LVL, tutkal ve nano ürün türü bakımından MUF-%4 SiO₂ kullanımı ile daha yüksek sonuçların elde edildiği ve kontrol gruplarına göre istatistiksel olarak önemli farklılıkların olduğu belirlenmiştir. Gruplar

arasındaki değişkenlerin önem düzeyini belirlemek için yapılan çoklu varyans analizi sonuçları Çizelge 9’da verilmiştir.

Varyans analiz sonuçlarına göre ahşap malzeme-lamine ve tutkal türleri arasındaki etkileşim önemsiz olduğu belirlenmiştir. Ancak diğer verilerde lamine malzemelerin dinamik eğilme direnci değerleri üzerinde etkileri bakımından tutkal çeşidi ve nano ürün maddeleri istatistiksel olarak önemli bulunmuş bu verilere Duncan testi uygulanmış ve sonuçları Çizelge 10’da verilmiştir.

Çizelge 8. Dinamik eğilme direnci etkilerine ilişkin ortalama sonuçlar

Table 8. Average results regarding dynamic bending resistance effects

		Ortalamalar	p≤0,05
Ahşap türü	Gökmar	0,39	0,153
	Kavak	0,34	
Lamine malzeme	Glulam	0,35	0,001
	LVL	0,37	
Tutkal	FF	0,34	0,000
	MUF	0,38	
Nano ürün	Kontrol	0,36	0,000
	TiO ₂ -%2	0,34	
	TiO ₂ -%4	0,35	
	SiO ₂ -%2	0,38	
	SiO ₂ -%4	0,39	

Çizelge 9. Dinamik eğilme direncine ait çoklu varyans analizi sonuçları

Table 9. Multivariate analysis results of dynamic bending resistance

Varyasyon kaynağı	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F hesap	P≤0,05
Düzeltilmiş model	1,004 ^a	39	0,026	25,204	0
Kesişim	63,082	1	63,082	61741,02	0
Ahşap türü	0,365	1	0,365	356,899	0
Lamine malzeme	0,034	1	0,034	32,788	0
Tutkal	0,165	1	0,165	161,875	0
Nano ürün	0,175	4	0,044	42,875	0
Ahşap türü*Lamine malzeme	0,017	1	0,017	16,562	0
Ahşap türü*Tutkal	0,024	1	0,024	23,71	0
Ahşap türü*Nano ürün	0,017	4	0,004	4,13	0,003
Lamine malzeme*tutkal	0,023	1	0,023	22,883	0
Lamine malzeme*Nano ürün	0,023	4	0,006	5,561	0
Tutkal*Nano ürün	0,029	4	0,007	6,98	0
Ahşap türü*Lamine Malz.*Tutkal	0,003	1	0,003	2,985	0,085
Ahşap türü*Lamine M*Nano ürün	0,02	4	0,005	4,839	0,001
Ahşap türü*Tutkal*Nano ürün	0,08	4	0,02	19,656	0
Lamine malz.*Tutkal*Nano ürün	0,016	4	0,004	3,947	0,004
Ahşap türü*Lam. Malzeme*Tutkal*Nano ürün	0,014	4	0,003	3,323	0,011
Hata	0,45	440	0,001		
Toplam	64,536	480			
Düzeltilmiş toplam	1,454	479			

a. R² = 0,691 (Düzeltilmiş R² = 0,663)

Çizelge 10. Dinamik eğilme direncine ait ortalama değerler
Table 10. Average values of dynamic bending resistance

Ahşap türü	Lamine Malzeme	Tutkal	Nano	Ortalamalar (N/mm ²)	Varyasyon katsayısı	Homojenlik P≤0,05
Gökmar	Glulam	FF	Kontrol	0,36	6,9	k-m
			TiO ₂ -%2	0,37	8,5	l-n
			TiO ₂ -%4	0,36	9,1	i-m
			SiO ₂ -%2	0,38	8,2	l-n
			SiO ₂ -%4	0,39	8,6	m-o
		MUF	Kontrol	0,39	7,5	m-o
			TiO ₂ -%2	0,37	10,0	l-n
			TiO ₂ -%4	0,40	7,7	no
			SiO ₂ -%2	0,44	8,3	r
			SiO ₂ -%4	0,42	8,7	op
	LVL	FF	Kontrol	0,35	9,1	h-l
			TiO ₂ -%2	0,36	7,5	h-l
			TiO ₂ -%4	0,32	6,8	b-e
			SiO ₂ -%2	0,36	7,5	j-m
			SiO ₂ -%4	0,40	9,2	no
		MUF	Kontrol	0,42	8,9	op
			TiO ₂ -%2	0,37	9,7	l-n
			TiO ₂ -%4	0,40	9,1	no
			SiO ₂ -%2	0,46	7,5	r
			SiO ₂ -%4	0,49	7,0	s
Kavak	Glulam	FF	Kontrol	0,29	10,8	a
			TiO ₂ -%2	0,28	10,1	a
			TiO ₂ -%4	0,32	8,9	b-g
			SiO ₂ -%2	0,32	10,0	b-g
			SiO ₂ -%4	0,35	9,5	g-l
		MUF	Kontrol	0,33	8,0	c-h
			TiO ₂ -%2	0,31	11,2	a-d
			TiO ₂ -%4	0,32	11,1	b-f
			SiO ₂ -%2	0,33	11,4	d-j
			SiO ₂ -%4	0,35	8,1	f-l
	LVL	FF	Kontrol	0,30	10,9	k-m
			TiO ₂ -%2	0,30	10,1	ab
			TiO ₂ -%4	0,35	13,4	e-l
			SiO ₂ -%2	0,36	8,6	j-m
			SiO ₂ -%4	0,36	10,3	j-m
		MUF	Kontrol	0,43	6,7	pr
			TiO ₂ -%2	0,33	6,7	d-i
			TiO ₂ -%4	0,34	6,9	d-k
			SiO ₂ -%2	0,35	9,0	f-l
			SiO ₂ -%4	0,38	7,3	l-n

Çizelge 10'da lamine malzemelerin dinamik eğilme direnci değerleri varyans analizi yardımıyla karşılaştırılmış ve gruplar arasında istatistiksel olarak önemli farklılıklar tespit edilmiştir. Yapılan araştırma sonunda tutkal türü ve nano ürün kullanım oranının lamine malzemelerin dinamik eğilme direnci üzerine olumlu yönde belirgin etkisi görülmüştür. Test sonuçları grup içi kontrol örnekleri ile karşılaştırıldığında en yüksek değerlere 0,49 kgm/cm² ile %4 SiO₂ nano ürün ile modifiye edilen ve MUF tutkalı ile yapıştırılan gökmar-LVL deney numunelerinde elde edilmiştir. En düşük 0,28 kgm/cm² ile %2 TiO₂ nano ürünle modifiye edilen ve FF tutkalı ile yapıştırılan kavak-GLULAM kontrol örneklerinde tespit edilmiştir. Test sonuçlarına göre nano ürün arttıkça dinamik eğilme direncinde az da olsa bir artış görülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar literatürde yapılan çalışmaların sonuçlarıyla (Candan, 2012) benzerlik göstermiştir.

Ahşap türü bakımından dinamik eğilme direnci değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değerlere gökmar-LVL örneklerinde gerçekleşmiştir. Bu durum nano ürün ilavesi ile yüzey alanı artan tutkalın sıcak presleme aşamasında kaplama tabakaları arasında daha iyi bağ yapmış olması

düşünülebilir. Elde edilen bulguların literatürde yapılan önceki çalışmaların Çil (2012)'nin sonuçlarıyla örtüştüğü anlaşılmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan çalışmada nano ürünlerle (TiO₂ ve SiO₂) modifiye edilmiş reçinelerin (MUF ve FF) gökmar ve kavak ağaçlarından elde edilen LVL ve GLULAM lamine malzemelerin bazı mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan testler sonucunda;

Nano ürünlerle modifiye edilen tutkalarla yapıştırılan kompozit malzemelerin mekanik direnç özellikleri üzerinde olumlu yönde belirgin etkisinin olduğu ve masif kontrol gruplarından daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Test sonuçları kontrol örnekleriyle karşılaştırıldığında optimum değerlere yoğunluk bakımından %12,7 artış %2 TiO₂ nano ürün ile modifiye edilmiş MUF reçinesi ile yapıştırılan gökmar-LVL örneklerinde tespit edilmiştir.

Liflere paralel basınç direncinde %22,96 artış ile %4 TiO₂ nano ürün ile modifiye edilen MUF tutkalı ile

yapıştırılan kavak-LVL deney örneklerinde tespit edilmiştir. Literatürde, lamine malzemelerde %5 nanokil kullanımı ile çekme direncinde %50, eğilme direncinde %15 ve elastikiyet modülünde %10 artış bulunmuştur (Boumer vd., 2022; Salari vd. 2012). Literatür bulguları bu çalışmada nano ürünlerin olumlu etkisini desteklemektedir.

Dinamik eğilme direncinde ise %16,66 artışla %4 SiO₂ nano ürün ile modifiye edilen ve MUF tutkalı ile yapıştırılan göknar-LVL deney gruplarında elde edilmiştir. Bu konuda Kaymakçı (2015), %1 SiO₂ ve Al₂O₃ nano ürün kullanılımasının çekme direnci, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerini arttırdığını belirtmiştir. Bu sonuçlar da nano ürünler ile mifiye dilen tutkalların dirençlerinin arttığını ispatlamaktadır.

Lamine malzemelerin mekanik özellikler bakımından yüksek performans göstermesinde tutkal türü olarak nano ürünlerle modifiye edilmiş MUF reçinesinin, lamine malzeme türü bakımından LVL'nin önemli bir etkisi olmuştur. Ayrıca nano ürün ve tutkal artışına paralel mekanik dirençlerde artış gerçekleşmiştir. LVL malzemelerde katman sayısının fazla olması ve bunun yanında tutkal oranının da artması yoğunluk artışına neden olduğu düşünülmektedir. Boumer ve Younes (2022) yaptıkları mekanik testlerde polilaktik asit filmlere nano parçacıkların eklenmesiyle mekanik mukavemet ve elastikiyet modülünün arttığını belirtmektedirler. Ayrıca, Wang vd. (2015) ve Li vd. (2020), hibrit lamine ahşap (HCLT)'in, LSL/LVL'nin masif malzemelerin CLT'den daha yüksek bir eğilme performansı elde etmeleri, bu çalışmada dinamik eğilme direncinin yüksek çıkmasıyla uyumludur.

Atar vd. (2016) nano ürünlerle modifiye edilen FF ve MUF yapıştırıcıları nano ürünlerle (TiO₂, SiO₂, Al₂O₃, ZnO vb.) modifiye edilmesi halinde mobilya endüstrisinde kullanımı oldukça yaygınlaşacağını desteklemektedir. Bu doğrultuda çeşitli reçine türleri ve nano ürünler ile yeni çalışmalarının yapılması önerilebilir. Sonuç olarak;

- Orman ürünleri endüstrisinde nano ürünlerle modifiye edilen reçinelerin kullanılması ile atık ya da fire olarak nitelendirilen odun esaslı malzemeler yapısal amaçlı lamine malzeme GLULAM, LVL vb. üretimlerde değerlendirilebilir. Aynı zamanda ürün kalitesi ve maliyetler açısından yüksek frekanslı presleme yöntemleri teşvik edilebilir.

- Ülkemizin deprem kuşağında olması ve son yıllarda orman yangınlarında da artış görülmesi gibi nedenlerle ormanın tüketilmemesi için iç ve dış mekanlarda iyileştirilmiş GLULAM ve LVL gibi ahşap esaslı lamine malzemelerin kullanılması tavsiye edilebilir.

Açıklama

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Prof. Dr. Ayhan Özçifçi danışmanlığında Mehmet Erdal Kara tarafından yürütülen bir doktora tezine dayanmaktadır. Testlerin gerçekleşmesinde desteklerinden dolayı SFC Entegre Orman Ürünleri Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Mobilya ve Dekorasyon Bölümü'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- ASTM D 3737-18e1, 2023. Standard practice for establishing allowable properties for structural glued laminated timber (glulam). Annual Book of ASTM Standards.
- Atar, İ., Başboğa, İ.H., Karakuş, K., Mengeloğlu, F., 2016. Kayın ve Kavak kaplamaların melamin formaldehit tutkalı kullanılarak lamine kaplama kereste üretimine uygunluğu. *Mugla Journal of Science and Technology*, 2(2):131-134.
- Ayanleye, S., Udele, K., Nasir, V., Zhang, X., Miltz, H., 2022. Durability and protection of mass timber structures: A review. *Journal of Building Engineering*, 46:1-24.
- Boumer, A., Younes A., 2022. Effect of ZnO, SiO₂ and Al₂O₃ doped on morphological, optical, structural and mechanical properties of polylactic acid. *Key Engineering Materials*, 911:105-113.
- 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.
- Candan, Z., 2012. Ahşap sandviç panel ve laminat parke üretiminde nanopartikül kullanımı ve teknolojik özellikler üzerine etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Çil, M., 2012. Tutkal katman kalınlığının tabakalanmış kaplama kerestelerin (TAK) fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Kaymakçı, A., 2015. Çeşitli güçlendirici dolgularla üretilen ahşap plastik nanokompozitlerin karakterizasyonu. Doktora Tezi, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Li, Q., Wang, Z., Liang, Z., Li, L., Gong, M., Zhou, J., 2020. Shear properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB. *Construction and Building Materials*, 261:120504.
- Liang, Z., Chen, G., Wang, Y., Wang, Z., Gong, M., 2022. The dimensional stability and bonding performance of hybrid CLT fabricated with lumber and COSB. *Buildings*, 12:1669.
- O'Ceallaigh, C., Harte, A.M., 2019. The elastic and ductile behavior of CLT wall-floor connections and the influence of fastener length. *Engineering Structures*, 189:319-31.
- Salari, A., Tabarsa, T., Khazaeian, K., Saracian, A., 2012. Effect of nanoclay on some applied properties of oriented strand board (OSB) made from underutilized low quality paulownia (*Paulownia fortunei*) wood. *Journal of Wood Science*, 58:513-524.
- Song, H., Wang, Z., Gong, Y., Li, L., Zhou, J., Gong, M., 2021. Low-cycle fatigue life and duration of-load effect for hybrid CLT fabricated from lumber and OSB. *Journal of Building Engineering*, 46:103832.
- TS EN 323, 1999. Ahşap esaslı levhalar-birim hacim ağırlığının tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 408+A1, 2015. Ahşap yapılar - Yapı kerestesi ve yapıştırılmış lamine kereste – Bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin tayini. TSE, Ankara.
- TS 2477, 1976. Odunun çarpmada eğilme dayanımı tayini, TSE, Ankara.
- Wang, Z., Gong, M., Chui, Y., 2015. Mechanical properties of laminated strand lumber and hybrid cross-laminated timber. *Constructions and Building Materials*, 101:622-7.
- Wang, Z., Fu, H., Gong, M., Luo, J., Dong, W., Wang, T., Chui, YH., 2017. Planar shear and bending properties of hybrid CLT fabricated with lumber and LVL. *Constructions and Building Materials*, 151:172-177.
- Xu, B., Zhang, S., Zhao, Y., Bouchaïr, A., 2021. Rolling shear properties of hybrid cross laminated timber. *Journal of Materials Civil Engineering*, 33(7):04021159.
- Yin, T., Wang, Y., Sun, C., Wang, Z., Reynolds, T.P.S., 2025. Laterally loaded behavior of connections in timber-timber composite (TTC) floor system: An experimental and analytical investigation. *Engineering Structures*, 342:1-19.
- Yin, T., Wang, Z., Sun, C., Zhou, W., Reynolds, T., 2024. Embedment behavior of hybrid cross laminated timber (HCLT) made of fast-growing Chinese fir and OSB. *Constructions and Building Materials*, 438:137117. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137117>