

Masif ve Lamine Edilmiş Ağaç Malzemelerde Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülünün Belirlenmesi

Ali KASAL, Hasan EFE, Taner DİZEL

ÖZET

Bu çalışmada, farklı ağaç türlerinden hazırlanan lamine edilmiş ve masif ağaç malzemelerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü belirlenmiştir. Doğu kayını (*Fagus orientalis* Lipsky), sarıçam (*Pinus sylvestris* Lipsky) ve kavak (*Populus nigra*) odunlarından hazırlanan örneklere eğilme direnci ve elastikiyet modülü deneyleri yapılmıştır. Çalışmada ayrıca lamine malzemelerin eğilme kalitesi değerleri de hesaplanmıştır. Sonuç olarak; en yüksek eğilme direnci ve elastikiyet modülü Doğu kayınında, en düşük ise kavakta elde edilmiştir. Eğilme direnci, tutkal hattına dik lamine malzemelerde, tutkal hattına paralel lamine malzemelerden daha yüksek bulunmuş, elastikiyet modülü değerlerinde ise bunun tersi bir sonuç elde edilmiştir. Eğilme kalitesi değerleri, laminasyon işleminde düşük çıkmıştır. Buna göre, teknik ve ekonomik yönden birçok avantajları bulunan lamine malzemelerin masif malzemelere alternatif yapı malzemesi olarak ve çerçeve konstrüksiyonlu mobilya üretiminde kullanılabilmesi söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Eğilme direnci, elastikiyet modülü, Doğu kayını, sarıçam, kavak, lamine malzeme.

Determination of the Bending Strength and Modulus of Elasticity of Solid Wood and Laminated Veneer Lumber

ABSTRACT

In this study, bending strength (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of the laminated veneer lumber (LVL) and solid wood materials which are constructed of different wood species were determined. Solid wood and LVL constructed of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky), scotch pine (*Pinus sylvestris* Lipsky) and poplar (*Populus nigra*) were tested for determining bending strength and modulus of elasticity. Furthermore, bending quality values of the materials were calculated. As a result; the highest bending strength and modulus of elasticity were obtained with beech in solid form, and the lowest one with poplar in solid form. In static bending tests, the laminated materials perpendicular to the glue line were yielded higher results than the laminated materials parallel to the glue line, in opposition, in the modulus of elasticity values, the laminated materials parallel to the glue line have been given higher results than the laminated materials perpendicular to the glue line. It was observed that the bending quality values of the materials decrease after the lamination process. In conclusion, it can be said that the laminated materials which has a number of technical and economical advantages could be utilized instead of solid wood material as an alternative structural material and could be used in production of the furniture frames.

Keywords: Bending strength (MOR), modulus of elasticity (MOE), Oriental beech, Scotch pine, poplar, laminated veneer lumber (LVL).

1. GİRİŞ

Yapı endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulunan lamine edilmiş malzemeler, günümüzde mobilya endüstrisinde de kullanılmaya başlanmıştır. Bunun nedenleri, masif malzemeye göre daha kusursuz ve büyük boyutlarda elde edilebilmesi ve yüksek direnç özellikleri

gösteren bir yapı malzemesi olması olarak sıralanabilir. TS EN 386'ya göre lamine ahşap; ahşap kaplamaların lifleri birbirine paralel olarak yapıştırılmasıyla elde edilen yapı elemanı olarak tanımlanmaktadır (1).

Dayanıklı tutkallarla (üreformaldehit, melamin formaldehit, fenol formaldehit) yüzeysel olarak yapıştırılmış kaplama ve kerestelerden üretilen malzemelerle daha büyük boyutlu ahşap malzemeler elde edilmektedir. Böylece masif haldeki odun malzemenin binalarda kullanımını sınırlayan bir takım sakıncalı yönleri giderilmiş olmaktadır (2).

5 mm kalınlığındaki Toros sediri (*Cedrus libani* A. Rich), sarıçam (*Pinus sylvestris* Lipsky), Doğu kayını (*Fagus orientalis* Lipsky) ve sapsız meşe (*Quercus petraea* Lipsky) kaplamalarından, PVAc-D4 tutkalı ile 4 katmanlı olarak lamine edilmiş ağaç malzemelerin teknolojik özellikleri, bu ağaç türlerini temsil eden masif ağaç malzemelerden daha üstün çıkmıştır (3). Doğu ka-

Makale 07.02.2007 tarihinde gelmiş 27.10.2010 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

A. KASAL, Muğla Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 48000, Kötekli, MUĞLA

e-posta : alikasal@mu.edu.tr

H.EFE, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, mobilya ve Dekorasyon Eğitimi Bölümü, Teknikokullar, ANKARA

e-posta : hasanefe@gazi.edu.tr

T. DİZEL, Pamukkale Üniversitesi, Denizli Meslek Yüksekokulu, Teknik Programlar, Mobilya ve Dekorasyon Programı, 20070, Kınıklı, DENİZLİ

e-posta : tdizel@pau.edu.tr

Digital Object Identifier 10.2339/2010.13.3, 183-190.

yını (*Fagus orientalis Lipsky*), sapsız meşe (*Quercus petraea Lipsky*) ve sarıçam (*Pinus sylvestris Lipsky*) odunlarından Kleberit 303, PVAc ve poliüretan (Desmodur-VTKA) tutkalları ile 3, 5 ve 7 katlı olarak hazırlanan lamine ağaç malzemelerde en yüksek eğilme direnci, PVAc tutkalı ile yapıştırılmış 5 katmanlı Doğu kayınında elde edilmiştir (4). Doğu kayını (*Fagus orientalis Lipsky*) ve sarıçam (*Pinus sylvestris Lipsky*) odunlarından PVAc-D4 tutkalı ile hazırlanan lamine malzemede kama dişli boy birleştiriminin eğilme direncine etkileri araştırılmış, lamine malzemelerde eğilme direncinin kontrol örneklerine göre Doğu kayınında % 17, sarıçamda % 20 azaldığı bildirilmiştir (5). 3 mm kalınlıklarda kavak (*Populus nigra*) odunundan elde edilen kesme kaplamalar (B) ile Doğu kayını odunundan elde edilen soyma kaplamalar (A), “7A”, “7B”, “ABBBBA”, “ABABABA”, “AABBBA” ve “AABABAA” simetrisinde, lifleri birbirine paralel ve 7 katmanlı olacak şekilde poliüretan (Desmodur-VTKA), üre formaldehit ve kleberit-303 tutkalları ile yapıştırılmış ve eğilme dirençleri araştırılmıştır. En yüksek eğilme direncinin sırası ile “ABBBBA” katman simetrisi ve soğuk uygulamalı laminasyonda Desmodur-VTKA, kleberit-303, sıcak uygulamalı laminasyonda ise üre formaldehit tutkalında olduğu bildirilmiştir (6). Kızılağaçtan (*Alnus glutinosa*) hazırlanan, 2 mm katman kalınlığındaki laminelerin 4 mm katman kalınlığındaki laminelere oranla daha dirençli olduğu bildirilmiştir (7). Çam türü lamine elemanlarda mekanik direnç özellikleri araştırılmış, daha çok ahşap ev imalatında yatay ve düşey taşıyıcı olarak kullanılan lamine ahşap elemanında eğilme ve basınç (burkulma) dirençleri belirlenmiştir. Bu amaçla deneylerde sarıçam (*Pinus sylvestris L.*) ve Rus çamı (*Pinus sibirica*), yapıştırıcı olarak Kleberit 305 tutkalı kullanılmıştır. Gerçek boyutlarda hazırlanan dört katmanlı numunelere DIN 52 185 esaslarına göre basınç yükü, altı katmanlı numunelere DIN 52 186 esaslarına göre eğilme yükü uygulanmıştır. Denemeler sonunda, en yüksek eğilme ve basınç direncinin sarıçamda olduğu bildirilmiştir (8). Lamine katman teşekkülünün mekanik dirençlere etkilerinin belirlendiği çalışmada, değişik katman simetrisinden oluşan sarıçam (*Pinus sylvestris L.*) ve kavak (*Populus nigra*) deney örneklerine eğilme ve çekme deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarında, lamine ahşabın eğilme ve yapışma direnci ile yoğunluğunun, sarıçam katmana bağlı olarak arttığı, lamine malzemenin eğilme direncinin yoğunluğa oranlandığında ise en uygun katman simetrisinin (A:sarıçam kaplama olmak üzere) “ABBBBA” simetrisi malzemelerde olduğu bildirilmiştir (9).

Bu çalışmada, polivinilasetat tutkalıyla lamine edilmiş, 11 katmandan oluşan, 2 mm katman kalınlığındaki farklı ağaç türlerinden hazırlanan lamine ve kontrol örneği masif ağaç malzemelerin eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, lamine malzemelerin yoğunluğu ile eğilme direnci arasındaki ilişkiler incelenmiş ve matematiksel modeller haline getirilmiş ve laminasyon yöntemi ile elde edilen ağaç malzemelerin eğilmede ka-

lite faktörü değerleri hesaplanarak eğilme kaliteleri belirlenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

2.1.1. Ağaç malzemeler

Türkiye mobilya endüstrisindeki yaygın kullanımı nedeniyle Doğu kayını (*Fagus orientalis Lipsky*), sarıçam (*Pinus sylvestris Lipsky*) ve kavak (*Populus nigra*) odunları deney malzemesi olarak seçilmiştir. Papel kaplama ve keresteler Ankara Siteler piyasasından temin edilmiştir. Bu malzemelerin seçiminde; kuru, sağlam, doğal renkli, kusursuz, liflerinin birbirine paralel, lif kıvrıklığı olmaması, böcek ve mantar zararlarına uğramamış olması gibi I. sınıf malzeme ölçütlerine uygunluğuna dikkat edilmiştir.

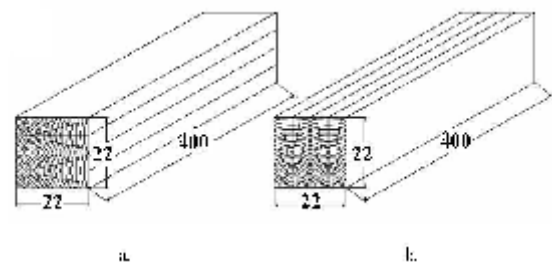
2.1.2. Polivinilasetat tutkalı

Bu çalışmada laminasyon işlemlerinde, soğuk olarak uygulanması, kolay sürülmesi, çabuk sertleşmesi, kokusuz ve yanmaz olması gibi özellikleri nedeniyle mobilya endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, TS 3891 (10)'e uygun polivinilasetat (PVAc) tutkalı tercih edilmiştir. Kullanılan tutkalın özellikleri üretici firma tarafından yoğunluk $1,1 \text{ g/cm}^3$, vizkositesi 160–200 cps, PH = 5,00, kül miktarı % 3 olarak verilmiştir (11).

2.2. Yöntem

2.2.1. Deney örneklerinin hazırlanması

Deneylerde, 3 ağaç türünden masif ve lamine olmak üzere toplam 6 deney örneği çeşidi kullanılmıştır. Lamine malzemelerde, tutkal hattına dik ve paralel yöndeki dirençler hesaplanacağı için, bu malzemeler masif malzemelere göre sayıca 2 kat fazla hazırlanmıştır. Buna göre, her bir örnekten de 12 adet olacak şekilde 400 x 400 x 22 mm ölçülerinde toplam 108 deney örneği hazırlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Tutkal hattına dik (a) ve paralel (b) lamine elemanlar

Temin edilen kereste ve kaplamalar havalandırılan ve direk güneş ışığı almayan bir ortamda aralarına göknar latalar konularak doğal kurumaya bırakılmıştır. Lamine malzemelerin hazırlanmasında, 2 mm kalınlığındaki papel kaplamalar, lifleri uzunluk yönünde birbirine paralel olacak şekilde yapıştırılmış ve katlar arasındaki rutubet farkının % 5 den fazla olmamasına dikkat edilmiştir. Lamine deney örnekleri 11 katmandan oluşturulmuştur. PVAc tutkalı $150\text{--}200 \pm 10 \text{ gr/m}^2$ hesabıyla sürülmüş, laminasyonun yapıldığı ortamın sıcaklığının 15 C° nin altına düşmemesine özen gösterilmiştir. Tutkal çözeltisinin başlangıçtaki ağırlığı ile tutkallama

işleminde sonraki ağırlığı 0,01 g duyarlıklı analitik terazinin yardımıyla tartılmış ve kullanılan tutkal miktarı (firçada kalan miktar hesaba katılarak) tutkallanan toplam yüzeye bölünmüştür. Pres basıncı, kavakta 0,8, sarıçamda 1 ve kayında 1,2 N/mm² olarak alınmış ve örnekler 2 saat preslenmiş vaziyette bekletilmişlerdir. Daha sonra da, tutkalın sertleşmesini tamamlaması amacıyla, bir ay süreyle işlem yapılmadan bekletilmişlerdir (1,12).

Daha sonra yapıştırılan lamine ve masif ağaç malzemeler net ölçülerine getirilmiş ve 25 ± 2 °C sıcaklık ve % 45 ± 5 bağıl nem şartlarındaki ortamda (r=%8) ağırlığı değişmez hale gelinceye, bir başka ifade ile denge rutubeti miktarına ulaşmaya kadar bekletilmişlerdir.

2.2.2. Deneilerin yapılışı

2.2.2.1. Rutubet ve yoğunluk

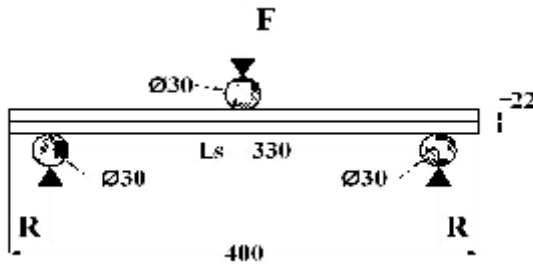
Masif ve lamine deney örneklerinin rutubetlerinin ölçülmesi için TS 2471 (13), yoğunluklarının belirlenmesi amacıyla da TS 2472 (14)'de belirtilen esaslara uyulmuştur.

2.2.2.2. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü

Deneiler, 4 ton kapasiteli “Üniversal Test Cihazı”nda yapılmıştır. Eğilme direnci deneylerinde masif ve lamine ağaç malzemeler için TS 2474 (15), standartlarında belirtilen esaslara uyulmuştur. 22x22 mm kare kesitli olarak hazırlanan eğilme direnci deney örneklerinin boyu 400 mm, olarak kesilmiş, deneyler esnasında destek noktaları arası açıklık (L_s=330 mm) kesit yüksekliğinin (h=22 mm) 15 katı olarak alınmıştır. Deneilerde yük örneklerin tam ortasından uygulanmış ve deney cihazının yükleme hızı kırılmanın 1,5 ± 0,5 dakikada gerçekleşmesini sağlayacak şekilde 2 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Kırılma anındaki maksimum yük (F_{max}) için eğilme direnci

$$(\sigma_e); \sigma_e = (3/2) \times (F_{max} \times L_s / b \times h^2) \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2.1)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır. Burada kesit genişliği (b), kesit yüksekliği ise (h)' dir. Eğilme direnci deney düzeneği Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Eğilme direnci deney düzeneği

Lamine malzemeler için tutkal hattına dik ve tutkal hattına paralel eğilme direnci deneyleri yapılmıştır. Tutkal hattına dik eğilme direnci deneylerinde, yükleme deney numunesi tutkal hattına dik konumda iken uygulanmıştır.

Eğilme deneylerinde, eğilmede elastikiyet modülü değerleri de hesaplanmıştır. Bu maksatla masif ve lamine ağaç malzemeler için TS 2478 (16)'de belirtilen esaslara uyulmuştur. Elastikiyet modülü (E), yük-yer değiştirme eğrisinin doğrusal kısmından yararlanılarak hesaplanmıştır. Yük-yer değiştirme eğrisinin doğrusal kısmına isabet eden her bir yük için belirli bir yer değiştirme değeri söz konusu olduğundan, (F₁) ve (F₂) kuvvetleri farkına (F) karşılık oluşan yer değiştirme miktarı (f) olmak üzere, elastikiyet modülü (E) :

$$E = F \times L_s^3 / 4 \times b \times x \times h^3 \times f \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2.2)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır. Burada ;

E : Elastikiyet modülü (N/mm²),

F : Uygulanan kuvvetler farkı (N),

L_s: Destek noktaları arası açıklık (mm),

b : Deney numunesi genişliği (mm),

h : Deney numunesi yüksekliği (mm),

f : Yer değiştirme miktarı (mm).

Deneilerden sonra, masif ve lamine malzemelerin % 12 rutubetteki eğilme direnci (σ_{e12}) ve yoğunluğuna (δ₁₂) göre eğilmede kalite faktörü değerleri hesaplanmıştır. Eğilme kalitesi değerleri (k_E);

$$k_E = \sigma_{e12} / 100 \times \delta_{12} \text{ (17)} \quad (2.3)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır. Odunun rutubeti higroskopik sınırlar içerisinde % 1 arttıkça eğilme direnci % 4 azalır (19). Buna göre, % 12 rutubetteki eğilme direnci değerleri;

$$\sigma_{e12} = \sigma_e [1 - 0,04 (0,12 - r)] \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (17)} \quad (2.4)$$

eşitliği ile, % 12 rutubetteki yoğunluk değerleri de;

$$\delta_{12} = \delta_0 (1 + 0,12) / (1 + 0,84 \times \delta_0 \times 0,12) \text{ (g/cm}^3\text{)} \text{ (17)} \text{ (2.5)}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

2.2.3. İstatistiksel değerlendirme

Deneilerde, 3 ağaç türü, 2 malzeme çeşidi ve her örnekten 12 adet olmak üzere 108 ölçüm yapılmış, gruplara ait en üst ve en alt değerlerin atılması ile kalan 90 ölçüm istatistiksel işlemlere alınmıştır. Ağaç türü (Doğu kayını, sarıçam, kavak) ve malzeme çeşidinin (masif, lamine), eğilme direnci ve elastikiyet modülü üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla çoklu varyans analizi yapılmıştır. Varyans kaynaklarının ve karşılıklı etkileşimlerinin (α = 0,05 için) anlamlı çıkması halinde, farklılıkların hangi ağaç türü ve malzeme çeşidi için önemli olduğu “en küçük önemli fark” (LSD: Least Significant Difference) testi ile belirlenmiştir. Lamine ağaç malzemelerde; yoğunluk-eğilme direnci ve yoğunluk-elastikiyet modülü arasındaki ilişkilerin tanımlanması için, en küçük kareler metoduna göre regresyon analizleri yapılmıştır. Analizlerden elde edilen regresyon katsayıları, matematiksel modeller haline dönüştürülmüş, determinasyon katsayıları da hesaplanarak elde edilen regresyon modellerinin güvenilirlik düzeyleri de belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Rutubet ve Yoğunluk

Masif ve lamine ağaç malzemeler için yapılan rutubet kontrolü, tam kuru ve rutubetli yoğunluk değerlerine ait ortalamalar varyasyon katsayıları ile birlikte Tablo 1’de verilmiştir. Tabloda ayrıca (2.5) formülü kullanılarak hesaplanan %12 rutubetteki (hava kurusu) yoğunluklar da verilmiştir.

Tablo 1. Masif ve lamine ağaç malzemenin rutubet ve yoğunluk değerleri

Ağaç türü	Malzeme çeşidi	Rutubet oranı (%)	v (%)	Tam kuru yoğunluk (gr/cm^3)	v (%)	Test Rutubeti yoğunluğu (gr/cm^3)	v (%)	Hava kurusu yoğunluk (gr/cm^3)
Doğu kayını	Masif	7,54	4,59	0,63	5,18	0,65	4,90	0,66
	Lamine	7,04	4,32	0,65	2,76	0,66	2,87	0,68
Sarıçam	Masif	8,49	3,62	0,46	3,09	0,48	3,37	0,49
	Lamine	8,09	8,99	0,54	2,99	0,56	2,97	0,57
Kavak	Masif	6,79	4,00	0,31	2,04	0,33	6,76	0,34
	Lamine	6,77	2,33	0,44	3,90	0,45	3,66	0,47

3.2. Eğilme Direnci

Deneylerden elde edilen istatistiksel değerler ve (2.4) eşitliği ile hesaplanan %12 rutubetteki eğilme direnci değerleri Tablo 2’de, varyans analizi sonuçları ise Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 2. Masif ve lamine ağaç malzemelerin eğilme direnci değerleri

Ağaç türü	Malzeme çeşidi	Eğilme direnci (N/mm^2)					
		X_{min}	X_{max}	X_{ort}	v (%)	σ_{el2} ($r=\%12$)	
Doğu kayını	Masif	75,4	155,8	123,7	21,87	101,63	
	Lamine	Paralel	59,2	96,1	82,4	19,60	66,05
		Dik	94,1	102,8	97,6	3,41	78,23
Sarıçam	Masif	64,6	91,2	77,1	11,74	66,27	
	Lamine	Paralel	66,3	84,9	73,1	9,24	61,66
		Dik	74,6	82,9	79,7	4,34	67,23
Kavak	Masif	48,9	76,6	61,6	12,85	48,76	
	Lamine	Paralel	52,2	80,0	65,6	15,75	51,87
		Dik	69,6	74,6	72,4	2,81	57,25

Tablo 3. Varyans analizi

Varyans kaynakları	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F Değeri	Hata ihtimali ($p<0.05$)
Ağaç türü	2	19071,071	9535,535	65,0715	0,0000
Malzeme çeşidi	2	2996,696	1498,348	10,2249	0,0001
AT x MÇ	4	6591,174	1647,793	11,2447	0,0000
Hata	81	11869,685	146,539	-	-
Toplam	89	40528,626	-	-	-

AT: Ağaç türü

MÇ: Malzeme çeşidi

Buna göre; ağaç türü, malzeme çeşidi ve ağaç türü-malzeme çeşidi ikili etkileşiminin malzemelerin eğilme direnci üzerindeki etkisi 0,05 yanılma olasılığı için anlamlı bulunmuştur. Ağaç türü faktörüne göre LSD kritik değeri $6,21 N/mm^2$ için yapılan karşılaştırma testinin sonuçları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Ağaç türüne göre eğilme direnci ortalamalarının karşılaştırılması

Ağaç türü	Eğilme direnci (N/mm^2)	
	(X)	HG
Doğu kayını	101,2	A
Sarıçam	76,65	B
Kavak	66,56	C

LSD $\pm 6,21 N/mm^2$

HG: Homojenlik grubu

Ağaç türüne göre, en yüksek eğilme direnci Doğu kayınında, en düşük kavakta bulunmuştur. Eğilme direnci Doğu kayınında, sarıçamdan % 24, kavaktan ise % 34 daha yüksek çıkmıştır. Sarıçamın eğilme direnci

ise kavaktan % 13 daha yüksektir. Yoğunluğun artması, eğilme direncini artırıcı etki yapmış olabilir.

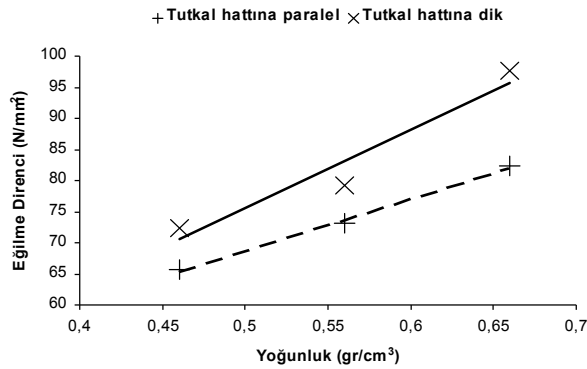
Lamine edilmiş ağaç malzemelerin deney sırasındaki rutubet derecesinde, yoğunlukları ile eğilme dirençleri arasındaki ilişkinin incelenmesi için yapılan regresyon analizleri sonucunda, yoğunluk ile lamine

ağaç malzemelerin eğilme direnci arasındaki ilişkinin tanımlanmasında tutkal hattına dik lamine malzemeler için (2.6), tutkal hattına paralel lamine malzemeler için de (2.7) eşitlikleri elde edilmiştir (Şekil 3).

$$y = 125,6x + 12,731 \quad (2.6)$$

$$y = 83,6x + 26,877 \quad (2.7)$$

Burada; y : lamine edilmiş ağaç malzemelerin rutubetli eğilme direnci (N/mm^2), x : rutubetli yoğunluk (gr/cm^3)'tur.



Şekil 3. Eğilme direnci – yoğunluk ilişkisini gösteren regresyon çizgileri

Determinasyon katsayıları, tutkal hattına dik örnekler için $r^2 = 0,9336$, tutkal hattına paralel örnekler için $r^2 = 0,996$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre, yoğunluk ile tutkal hattına dik ve paralel lamine elemanların eğilme direnci arasındaki ilişki için yapılan regresyon modellerinin güvenilirliği $Pr > 0,01$ düzeyinde gerçekleşmiştir. Malzeme çeşidine göre LSD $6,21 N/mm^2$ kritik değeri kullanılarak yapılan eğilme direnci değerleri ortalamalarının karşılaştırma sonuçları Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Malzeme çeşidine göre eğilme direnci değeri ortalamalarının karşılaştırması

Malzeme çeşidi		Eğilme direnci (N/mm^2)	
		(\bar{X})	HG
Masif		87,49	A
Lamine	Paralel	73,69	B
	Dik	83,24	A

LSD $\pm 6,210 N/mm^2$

Buna göre, masif malzeme ile tutkal hattına dik lamine malzemeler istatistiksel açıdan farklı olmayan eğilme direnci değerleri vermişlerdir. Bu durum, lamine malzemelerin tutkal hattına dik pozisyonda kullanıldığı takdirde, eğmeye çalışan yüklere karşı masif ağaç malzemeler kadar mukavemetli olacağını göstermektedir. Tutkal hattına paralel lamine malzemeler, masif ağaç malzemeye göre % 15,7, tutkal hattına dik lamine malzemelere göre de % 11,4 daha düşük eğilme direnci göstermişlerdir. Tutkal hattına paralel malzemelerin, tutkal hattına dik malzemelere göre düşük değerler vermesinde, tutkal hatlarının yüklem sırasında önemli bir

kesme zorlamasına maruz kalmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Gerek tutkal hattına dik, gerekse tutkal hattına paralel yönde, lamine edilmiş malzemelerin, masif malzemelere göre daha düşük değerler vermesinde, laminasyon işleminde kullanılan yapıştırıcı madde, kohezyon kuvvetini azaltıcı etki yapmış olabilir. Lamine edilmiş malzemelerde, eğilme yükü altında ağaç malzeme ile tutkal molekülleri arasındaki adezyon kuvveti, ağaç malzemenin kendi molekülleri arasındaki kohezyon kuvvetinden daha fazla önem kazanmakta ve bu bölgeler zorlanmaktadır. Ağaç türü – malzeme çeşidi etkileşiminde, LSD kritik değeri $10,76 N/mm^2$ için yapılan eğilme direnci değeri ortalamalarının karşılaştırma sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Ağaç türü–malzeme çeşidi ikili etkileşimi sonuçları

Ağaç türü–malzeme çeşidi		Eğilme direnci (N/mm^2)		
		(\bar{X})	HG	
Doğu kayını	Masif	123,7	A	
	Lamine	Paralel	82,36	C
		Dik	97,56	B
Sarıçam	Masif	77,15	C	
	Lamine	Paralel	73,08	CD
		Dik	79,72	C
Kavak	Masif	61,59	E	
	Lamine	Paralel	65,64	DE
		Dik	72,44	CD

LSD $\pm 10,76 N/mm^2$

Ağaç türü ve malzeme çeşidi ikili etkileşimine göre, eğilme direnci en yüksek Doğu kayınında, en düşük kavakta elde edilmiştir. Tutkal hattına dik lamineler, tutkal hattına paralel laminelere göre daha yüksek eğilme direnci göstermiştir. Burada, tutkal hattına dik eğilme direnci deneyinde, ağaç malzemenin gösterdiği dirence ilave olarak tutkalın yapışma direncinin de katkısı olabilir. Tutkal hattına paralel eğilme direncinde, sadece ağaç malzemenin direnci etkili olabilir. Çünkü burada malzemenin stabilizesini sağlayan yapıştırıcının, direnç üzerindeki etkisinin diğer yöndeki yüklemeye göre daha az olacağı açıktır.

Sarıçam ve kavakta laminasyon işlemi eğilme direncini artırıcı etki göstermiştir. Sarıçam ve lamine malzemeler birbirlerine çok yakın değer vermiştir. Kavakta ise lamine malzemeler masif malzemeye göre daha yüksek çıkmıştır. Lamine malzemenin yüksek çıkmasının nedeni, kavak odununun hücre boşluğunun fazla olması ve yapıştırıcı maddenin hücrelere iyi nüfuz ederek kohezyon kuvvetini arttırmış olması olabilir.

Literatürde de özgül ağırlığı düşük ve hücre boşluğu çok olan ağaç malzemelerde laminasyon işleminin eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerinde artışa neden olduğu bildirilmektedir (12). Doğu kayını örneklerde ise, lamine malzemeler her iki yönde de kendi türünü temsil eden kontrol örneklerine göre daha düşük eğilme direnci göstermişlerdir.

Masif ve lamine ağaç malzemeler için, (2.3) eşitliği ile hesaplanan eğilme kalitesi değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Eğilme kalitesi değerleri; 10–15 arasında ise düşük, 16–20 arasında ise orta, 21–25 arasında ise yüksek olarak nitelendirilmektedir (17).

Tablo 7. Masif ve lamine ağaç malzemelerin eğilme kalitesi değerleri

Ağaç türü	Malzeme çeşidi		Eğilme kalitesi değeri (k_E)	Eğilme kalitesi
Doğu kayını	Masif		16	Orta
	Lamine	Paralel	10	Düşük
		Dik	12	Düşük
Sarıçam	Masif		14	Düşük
	Lamine	Paralel	11	Düşük
		Dik	12	Düşük
Kavak	Masif		15	Orta
	Lamine	Paralel	11	Düşük
		Dik	12	Düşük

Eğilme kalitesinin, laminasyon işlemi yapılmış malzemelerde düştüğü görülmüştür. Özellikle Doğu kayınının lamine edilmesi ile eğilme kalitesi değerinin önemli oranda düşüş gösterdiği dikkat çekmektedir. Tutkal hattına dik lamine malzemelerin eğilme kalitesi değerleri, tutkal hattına paralel lamine malzemelerden daha yüksek bulunmuştur.

3.3. Elastikiyet Modülü

Masif ve lamine ağaç malzemelerin eğilmede elastikiyet modülü için minimum, maksimum ve ortalama değerler varyasyon katsayıları ile birlikte Tablo 8'de, çoklu varyans analizi sonuçları ise Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 8. Masif ve lamine ağaç malzemelerin elastikiyet modülü değerleri

Ağaç türü	Malzeme çeşidi		Elastikiyet modülü (N/mm^2)			
			X_{min}	X_{max}	X_{ort}	v (%)
Doğu kayını	Masif		6230,2	16960,2	13502,9	31,52
	Lamine	Paralel	8399,4	11306,8	10725,3	11,42
		Dik	7914,8	11306,8	10046,9	16,26
Sarıçam	Masif		6515,8	11306,8	8889,4	19,64
	Lamine	Paralel	7914,8	11306,8	10967,6	9,78
		Dik	7914,8	11306,8	10289,2	15,92
Kavak	Masif		5653,4	7914,8	6504,4	12,53
	Lamine	Paralel	6515,8	11306,8	8991,8	22,95
		Dik	6958,1	8399,4	7820,4	6,33

Tablo 9. Varyans analizi

Varyans kaynakları	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F Değeri	Hata ihtimali ($p < 0.05$)
Ağaç türü	2	204199014,306	102099507,153	26,7556	0,0000
Malzeme çeşidi	2	11363141,884	5631570,942	1,4758	0,2347
AT x MÇ	4	109228934,460	27307233,615	7,1560	0,0001
Hata	81	309096721,239	3816008,904	-	-
Toplam	89	633787811,889	-	-	-

Varyans analizi sonuçlarına göre, ağaç türünün ve ağaç türü-malzeme çeşidi ikili etkileşiminin elastikiyet modülü üzerindeki etkileri 0,05 hata olasılığı için anlamlı bulunmuştur. Malzeme çeşidinin elastikiyet modülü üzerindeki etkileri ise istatistiksel anlamda önemsizdir.

Malzeme çeşidi de dikkate alınarak, ağaç türü faktörüne göre 1002 N/mm^2 LSD kritik değeri için yapılan karşılaştırma testi sonuçları Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Ağaç türüne göre elastikiyet modülü ortalamalarının karşılaştırması

Ağaç türü	Elastikiyet modülü (N/mm^2)	
	(X)	HG
Doğu kayını	11430	A
Sarıçam	10050	B
Kavak	7772	C

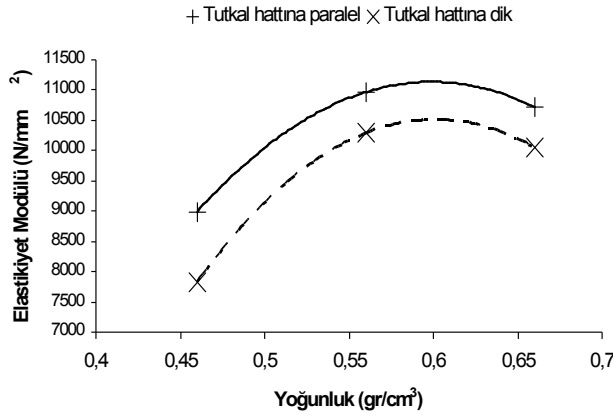
LSD \pm 1002 N/mm^2

Ağaç türüne göre yapılan karşılaştırma sonuçlarına göre, en yüksek elastikiyet modülünü sırasıyla Doğu kayını ve sarıçam vermiş, kavak ise en düşük değeri göstermiştir. Elastikiyet modülü değerleri ile yoğunluk arasındaki ilişkinin tanımlanması için yapılan regresyon analizleri sonucunda tutkal hattına dik lamine malzemeler için (2.8), tutkal hattına paralel lamine malzemeler için ise (2.9) eşitlikleri elde edilmiştir (Şekil 4).

$$y_E = 135555 x^2 + 162954 x - 38455 \quad (2.8)$$

$$y_E = 110905 x^2 + 132881 x - 28666 \quad (2.9)$$

Burada; y_E : lamine edilmiş ağaç malzemelerin rutubetli elastikiyet modülü (N/mm^2), x : rutubetli yoğunluk (gr/cm^3)'tur.



Şekil 4. Elastikiyet modülü – yoğunluk ilişkisini gösteren regresyon eğrileri

Buna göre, lamine ağaç malzemelerin deney rutubeti derecesindeki yoğunlukları ile elastikiyet modülü değerleri arasında eğrisel bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Determinasyon katsayıları, tutkal hattına dik örnekler için $r^2 = 0,999$, tutkal hattına paralel örnekler için $r^2 = 0,999$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre, yapılan regresyon modellerinin güvenilirliği $Pr > 0,001$ düzeyinde gerçekleşmiştir.

Ağaç türü–malzeme çeşidi ikili etkileşimine göre LSD kritik değeri 1736 N/mm^2 için elastikiyet modülü ortalamalarının karşılaştırma sonuçları Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Ağaç türü–malzeme çeşidi ikili etkileşimi karşılaştırma sonuçları

Ağaç türü–Malzeme çeşidi			Elastikiyet modülü (N/mm^2)	
			(X)	HG
Doğu kayını	Masif		13500	A
	Lamine	Paralel	10730	BC
		Dik	10050	BCD
Sarıçam	Masif		8889	DE
	Lamine	Paralel	10970	B
		Dik	10290	BCD
Kavak	Masif		6504	F
	Lamine	Paralel	8992	CDE
		Dik	7820	EF

LSD $\pm 1736 \text{ N/mm}^2$

Ağaç türü–malzeme çeşidi etkileşimine göre, elastikiyet modülü en yüksek Doğu kayınında, en kavakta bulunmuştur. Tutkal hattına paralel lamine malzemeler tutkal hattına dik lamine malzemelere oranla daha yüksek elastikiyet modülü değerleri vermişlerdir. Bunun nedeni, lamine malzemeyi oluşturan katmanların atalet (eylemsizlik) momentlerinin bu yönde çok daha yüksek olması, dolayısıyla daha stabil bir malzeme oluşturması olabilir. Laminasyon işlemi, Doğu kayınının elastikiyet modülü değerlerini düşürürken, sarıçam ve kavakın elastikiyet modülü değerlerini arttırmıştır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, lamine edilmiş Doğu kayını, sarıçam ve kavak malzemelerin eğilme dirençleri ve elastikiyet modülü değerleri aynı malzemelerin masifleri ile karşılaştırılarak belirlenmiştir. Ayrıca, eğilmede kalite faktörü değerleri hesaplanmıştır.

Doğu kayınının lamine edilmesi; eğilme direncinde ve elastikiyet modülünde düşüşe, sarıçam ve kavakın lamine edilmesi ise bu değerlere artışa neden olmuştur. Buna göre, sarıçam ve kavak odununun lamine edilerek kullanılması teknik ve ekonomik yönlerden yarar sağlayacaktır.

Masif ve lamine ağaç malzemeler eğilme direnci bakımından karşılaştırıldığında; tutkal hattına dik lamine malzemelerin masif ağaç malzemeler kadar mukavemetli olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, eğmeye zorlayan yüklere karşı lamine elemanların tutkal hattına dik pozisyonda kullanılması mukavemeti arttıracaktır. Elastikiyet modülü değerlerine bakıldığında, lamine malzemeler ile masif ağaç malzemeler arasındaki farklar istatistiksel anlamda önemsiz çıkmıştır. Bu durumda, elastikiyet gereken durumlarda, lamine malzemeler, masif ağaç malzemeler kadar güvenle kullanılabilir.

Lamine ağaç malzemelerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerinin, yoğunluğun fonksiyonu olduğu tespit edilmiştir. Yapılan regresyon analizleri sonucunda, yoğunluk ile eğilme direnci arasında doğrusal, yoğunluk ile elastikiyet modülü arasında ise eğrisel ilişkiler olduğu belirlenmiştir.

Deneyler sonucunda lamine malzemelerin, neredeyse masif ağaç malzemeler kadar eğilme direncine ve elastikiyete sahip olduğu belirlenmiştir. Ağaç malzemenin verimli kullanılabilmesi, kusurlarından arındırılması ve eği formulu imalatlarda liflerin diyagonalitesi nedeniyle direnç özelliklerinin azalmaması için, yapı malzemesi olarak ve özellikle de çerçeve konstrüksiyonlu mobilya üretiminde lamine malzemelerin kullanılması önerilebilir. Ayrıca, laminasyonda küçük boyutlu ağaç malzemeler kullanıldığından dolayı fire oranı önemli ölçüde azalmakta ve dolayısıyla da ürün maliyetleri düşmektedir.

Ülkemizde bulunması kolay ve ucuz olan kavak gibi ağaç malzemeleri kullanarak, genelde tek bir türün kullanılmasıyla yüksek maliyetli elde edilen lamine masif ağaç malzemeleri daha ucuza üretmek, boyutsal stabiliteyi sağlayarak kullanım ömrünü uzatmak ekonomik açıdan önemli avantajlar sağlayacaktır. Bu nedenle, ara katmanlarda uzuz, üst katmanlarda kaliteli ağaç türleri kullanılarak elde edilecek lamine malzemelerin gerekli fiziksel ve mekanik özellikleri ileriki çalışmalarda belirlenmelidir.

5. KAYNAKLAR

1. TS EN 386, “Yapıştırılmış Lamine Ahşap Performans Özellikleri ve Asgari Üretim Şartları”, T.S.E., Ankara, 1-4, 1999.
2. Kurtoğlu, A., “Yapıştırılmış Lamine Ağaç Yapı Elemanları”, Mobilya Dekorasyon Dergisi, Yıl 4, Sayı 21, 10–16, 1997.

3. Keskin, H., PVAc-D4 Tutkalı ile 4 Katmanlı Olarak Lamine Edilmiş Sarıçam, Toros Sediri, Doğu Kayını, Sapsız Meşe Odunlarının Teknolojik Özellikleri ve Ağaç İşleri Endüstrisinde Kullanım İmkanları, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2001.
 4. Döngel, N., Lamine Ahşap Malzemede Ağaç Türü, Katman Sayısı ve Tutkal Çeşidinin Eğilme Direncine Etkileri, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 1997.
 5. Örs, Y., Atar, M., ve Özçiftçi, A., “Lamine Ağaç Malzemede Kama Dışı Boy Birleştirmenin Eğilme Direncine Etkileri”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 14, No 2, 531-538, 2001.
 6. Altınok, M., “Lamine Ağaç Malzemede Katman Simetrisinin Eğilme Direncine Etkileri”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 15, No 2, 385-392 2002.
 7. Kılıç, Y., Güray, A., “Laminasyon Tekniğinin Kızılağaç (Alnus Glutinosa) Odununun Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi”, I. Ulusal Mobilya Kongresi Bildirisi, Ankara, 1996.
 8. Altınok, M., Döngel, N., “Çam Türü Lamine Elemanlarda Mekanik Performans”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 15, No 1, 215-225, 2002.
 9. Altınok, M., “Lamine Ahşapta Katman Teşekkülünün Mekanik Performansa Etkilerinin Belirlenmesi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 16, No 1, 217-224, 2003.
 10. TS 3891, “Yapıştırıcılar – Polivinilasetat Esaslı Emülsiyon (Ahşap Malzeme İçin)”, (Tadil AMD1: 1992 – 07), T.S.E. , Ankara, 1-4, 1982.
 11. Polisan, Üretici Firma, <http://www.polisan.com.tr>, Bolu, 1996.
 12. Keskin, H., “Lamine Edilmiş Doğu Ladini Odununun Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri” Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, Seri A, Sayı 1, 139-151, 2003.
 13. TS 2471, “Odunda, Fiziksel ve Mekanik Deneyler İçin Rutubet Miktarı Tayini”, T.S.E., Ankara, 1-3, 1976.
 14. TS 2472, “Odunda Fiziksel ve Mekanik Deneyler İçin Birim Hacim Ağırlığı Tayini”, *T.S.E. Standardı*, Ankara, 1-3 (1976).
 15. TS 2474, “Odunun Statik Eğilme Dayanımının Tayini”, T.S.E., Ankara, 1-3, 1976.
 16. TS 2478, “Odunun Statik Eğilmede Elastikiyet Modülünün Tayini”, T.S.E., Ankara, 1-3, 1976.
- Örs, Y., Keskin, H., Ağaç Malzeme Bilgisi, Atlas Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Yayın No 02, Ankara, 2001