

Farklı Odun ve Tutkal Türleri Kullanılarak Üretilen Lamine Kerestelerin (Glulam) Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Musa KAYA^{1*}, Ramazan BÜLBÜL², Hasan Özgür İMİRZİ², Nihat DÖNGEL²

¹ Atatürk Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Erzurum, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaçşçileri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Tarihiçesi

Gönderim: 11.12.2023

Kabul: 03.04.2024

Yayım: 23.04.2024

Araştırma Makalesi



Öz – Yapılan çalışmada, dış katmanı meşe ve sarıçam, iç katmanı ise sarıçam ve göknar odunlarından olan farklı kombinasyonlar ile polivinil asetat (PVAc) ve poliüretan (PÜR) tutkalları kullanılarak üretilen lamine kerestelerinin hava kuruğu yoğunluk değerleri, statik eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri, deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre lamine kerestelerin hava kuruğu yoğunluk değerlerine, sadece dış katmanda kullanılan odun türünün etkisinin anlamlı olduğu; eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde ise iç katmanda kullanılan odun türünün etkisinin anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre lamine kerestelerin hava kuruğu yoğunluk değeri en yüksek; dış katmanı meşe odunundan, iç katmanı ise göknar odunundan ve poliüretan tutkalı ile üretilen lamine kerestede 0.711 g/cm³ olduğu tespit edilmiştir. Statik eğilme direnci; en yüksek, dış katmanı meşe odunu, iç katmanı ise sarıçam odunundan ve poliüretan tutkalı ile üretilen lamine kerestede 77.35 N/mm² olduğu; eğilmede elastikiyet modülü değeri ise en yüksek, dış ve iç katmanı sarıçam odunundan ve polivinil asetat tutkalı ile üretilen lamine kerestede 10550.78 N/mm² olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen tüm bu bulgulara göre; incelemeye tabi tutulan odun türleri ve yapıştırıcı çeşitleri ile üretimi önerilebilecek lamine kereste kombinasyonu; dış katmanda sarıçam, iç katmanda ise sarıçam ya da göknar odunu ile yapıştırıcı olarak da poliüretan tutkalı şeklinde bir kombinasyon önerilebilir.

Anahtar Kelimeler – Lamine kereste, glulam, eğilme direnci, meşe ve göknar

Some Physical and Mechanical Properties of Laminated Timber (Glulam) Produced Using Different Types of Wood and Glue

¹ Atatürk Vocational and Technical Anatolian High School, Erzurum, Türkiye

² Gazi University, Faculty of Technology, Woodworking Industrial Engineering Department, Ankara, Türkiye

Article History

Received: 11.12.2023


Accepted: 03.04.2024


Published: 23.04.2024


Research Article


Abstract – In the study, air-dry density values, static bending strength and elasticity modulus values in bending of laminated timbers produced using different combinations of oak and Scots pine wood on the outer layer and Scots pine and fir wood on the inner layer and polyvinyl acetate (PVAc) and polyurethane (PUR) glues, was examined with experimental methods. According to the results obtained, only the type of wood used in the outer layer has a significant effect on the air-dry density values of laminated timber; It was determined that the effect of the type of wood used in the inner layer was significant on the values of bending strength and modulus of elasticity in bending. According to the results of the experiments, laminated timber has the highest air-dry density value; It has been determined that the laminated timber, whose outer layer is made of oak wood and whose inner layer is made of fir wood and polyurethane glue, is 0.711 g/cm³. Static bending strength; The highest value is 77.35 N/mm² in laminated timber, whose outer layer is made of oak wood and whose inner layer is made of Scots pine wood and polyurethane glue; The highest value of elasticity modulus in bending was determined as 10550.78 N/mm² in laminated timber whose outer and inner layers were produced from Scots pine wood and polyvinyl acetate glue. According to all these findings obtained in the study, the combination of laminated timber that can be produced with the wood species and adhesive types examined; a combination of yellow pine in the outer layer, yellow pine or fir wood in the inner layer and polyurethane glue as adhesive can be recommended.

Keywords – Laminated timber, glulam, bending strength, oak and fir

¹  kayamusa2512@gmail.com

²  ramazanbulbul@gazi.edu.tr

³  himirzi@gazi.edu.tr

⁴  ndongel@gazi.edu.tr

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. Giriş

İnsanoğlunun hayatında önemli bir kullanım alanına sahip olan ağaç malzeme; dünya nüfusunun artmasıyla ve endüstrileşme ile birlikte kullanım alanları artmış olup bunun sonucunda hızlı bir tüketim olgusuyla karşılaşmıştır. Meydana gelen bu tüketim artışı gerçeği, doğal bir malzeme olan ağaç malzemenin tedarik edilmesini zorlaştırmış ya da maliyetlerini artırmıştır.

Ağaç malzeme yenilenebilir en eski yapım malzemesidir. Geçmişte; gerek barınma amaçlı yapılarda ve gerekse köprüler, telefon ve elektrik direkleri, gemiler ve spor salonları gibi büyük kompleks yapıların imalatında etkin bir biçimde kullanılan (Issa ve Kmeid, 2005) ağaç malzeme çağımızda ise bu alanlara ek olarak ilaç yapımından (Özlüsoylu ve İstek, 2018) tekstil sektörüne (Alici ve Dalkılıç, 2022) kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Dolayısıyla meydana gelen bu gelişmeler neticesinde ağaç malzemenin daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılması zorunlu bir hal almıştır.

Ağaç malzemenin daha verimli bir şekilde kullanılabilmesi için ABD ve Kanada gibi gelişmiş ülkelerde gelişen sanayi ve yapılan bilimsel araştırmalar neticesinde; ağaçları sektöründe geliştirilen tutkallarla (Karayılmaz vd., 2007) lamine keresteler ya da mühendislik ürünü ağaç malzemeler üretilmiştir. Elde edilen bu ürünler ile mekaniksel direnç bakımından daha yüksek performans gerektiren orta ve yüksek katlı ahşap yapıların üretilmesine olanak sağlanmıştır (Svatoš - Ražnjević vd., 2022). Özellikle sivil mimari, kilise gibi dini yapılarda kullanılan lamine keresteler 2. Dünya Savaşı ile birlikte büyük mesafeli açıklıklara sahip askeri hangarların örtülmesinde de kullanılmıştır (Tokay, 1998). Aynı zamanda gelişen tutkal ve laminasyon teknolojisi ile direnç değerleri düşük, daha az ekonomik değere sahip odunlardan yüksek dayanıma sahip mühendislik ürünü odun esaslı malzemelerin üretilmesine de imkân sağlanmıştır (Dündar vd., 2016). Böylece mühendislik ürünü olarak bilinen; kontrplak, lamine kereste (Glulam), çapraz lamine ahşap paneller (CLT), tabakalanmış şerit kereste (LSL), yönlendirilmiş şerit keresteler (OSL) gibi (Yesügey vd., 2014) odun esaslı ürünlerin günümüzde de mobilya ve dekorasyon alanı ile ahşap yapı sektöründeki ihtiyacı karşılamak için üretimi devam etmektedir.

Mühendislik ürünü lamine kerestelerin günümüzdeki kullanım alanları ise çoğunlukla çatı yapımında kullanılmakla birlikte iç ve dış mekânlarda, ticari ve dini yapılarda, endüstriyel yapılarda, konut imalatında, çeşitli eğri formlara sahip kemerlerin yapımında, kubbe tavanları, merdiven basamakları gibi uygulamalarda kullanılabilirler (Mengeloğlu ve Kurt, 2004).

Tutkallanmış lamine kereste olarak bilinen Glulam; ağaç malzemenin daha az anizotropik özelliğe sahip aynı zamanda daha yüksek mekanik dirençleri olan kompozit bir malzemedir. Söz konusu bu malzemeler lif yönleri aynı doğrultuda ya da birbirine dik konumda düzenlenmiş; odun tabakalarının özellikle sertlik, dayanıklılık, su, nem, sıcaklık ve biyolojik zararlar gibi faktörlere karşı dayanıklı yapısal amaçlı tutkallarla preslenmesi sonucu elde edilen ürünlerdir (Kitek vd., 2010; Şenay, 1996). Lamine ağaç malzemenin lamine edilmesinde iki yüzey birbirine yapıştırılıyorsa; tutkalın lamellerin yıllık halkalarının dış bükey yüzeyine sürülmesi ile bu tür panellerde meydana gelebilecek iç gerilmelere karşı önlem alınmış olmaktadır (Kitek vd., 2010).

Lamine ağaç malzemeler eğilme kuvvetlerine maruz kaldıklarında üst yüzeyde basınç direnci etkin iken alt yüzeyde ise çekme direnci etkin olmaktadır. Dolayısıyla bu tür lamine ağaç malzemeler elde edilirken alt ve üst katmanlarda mekanik dirençleri yüksek ağaç malzemelerden elde edilmiş lamellerin kullanılması, ara katmanlarda ise yoğunluk ve direnç değerleri daha düşük lamellerin kullanılması; bu tür panellerin mekanik dirençlerinde önemli bir kayıp meydana getirmemektedir (Dündar vd., 2016).

Lamine kerestelerin üretilmesinde; kullanılan ağaç malzemenin anatomik yapısı, yüzey dokusu, uygulanan pres basıncı, presleme süresi ve kullanılan tutkalın teknik özellikleri gibi faktörler odunun yapışma direnci üzerinde etkili olan faktörlerdir (Dilik, 1997). Lamine ağaç malzemelerin mekanik dirençleri üzerinde etkili olan faktörlerden tutkal türü, odun faktöründen sonra önemli olan diğer bir etkidir (Uysal vd., 2005). Laminasyon işlemi önemli olan diğer bir faktör ise pres basıncı olup; yumuşak ağaçlar için 0.6 - 1 N/mm², sert ağaçlar için ise 0.2 - 1.6 N/mm² arasındaki değerlerde belirlenebilir. Ayrıca laminasyon uygulamasında birden fazla odun türü mevcut ise presleme basıncı yumuşak odun türlerine göre belirlenir (Dilik, 1997). Dolayısıyla bu tür faktörler dikkate alınarak yapılan laminasyon işlemi sonucunda elde edilen lamine ağaç malzemenin mekanik dirençlerinin de yüksek olması beklenilmektedir.

Son yıllarda yüksek yapışma direnci, dayanıklılık ve neme karşı dirençlerinden dolayı resorsinol-formaldehit (RF) ve fenol resorsinol-formaldehit esaslı yapıştırıcılar (PRF) ile formaldehit içermeyen poliüretan (PUR) polivinil asetat esaslı (PVAc) esaslı yapıştırıcılar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Klippel vd., 2011; Çavuş ve Bal, 2023). Kullanılan tutkallar genellikle uygulama amaçlarına bağlı olarak seçilmektedir. Dolayısıyla yapısal uygulamalar için fenol resorsinol-formaldehit (PRF) esaslı gibi tutkallar kullanılırken, mobilya üretimi gibi yapısal olmayan uygulamalar için ise polivinil asetat (PVAc) esaslı tutkallar kullanılmaktadır (Marra, 1984).

Yapılan bu çalışmada, dış katmanlarında sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ve sapsız meşe (*Quercus petraea* L.) odunları, iç katmanlarda ise sarıçam ve Uludağ göknarı (*Abies sp.* L.) odunları ile bunların yapıştırılmasında kullanılan poliüretan ve polivinil asetat tutkalları kullanılarak üretilen lamine kerestelerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinden olan yoğunluk değerleri ile tutkal ve odun türüne bağlı statik eğilme dirençleri ve eğilmede elastikiyet modülleri tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Yapılan bu çalışmadaki lamine kerestelerin (Glulam) elde edilmesinde kullanılan ağaç malzemeler; sapsız meşe (*Quercus petraea* L.), Uludağ göknarı (*Abies sp.* L.) ve sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) odunları kullanılarak elde edilmişlerdir. Çalışma kapsamında kullanılan bu ağaç malzemelerin seçilmesinde; düzgün lifli, budaksız, çatlaksız, reaksiyon odunu, çürüme, böcek ve mantar tahribatının olmaması gibi kriterler göz önüne alınarak; Ankara Siteler semtinde bulunan kereste ticareti yapan kuruluşlardan rastgele yöntemle seçilerek satın alma yoluyla temin edilmiştir. Lamine kerestelerin elde edilmesinde kullanılan ağaç malzeme türleri ve yapıştırıcılara ait bazı özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1

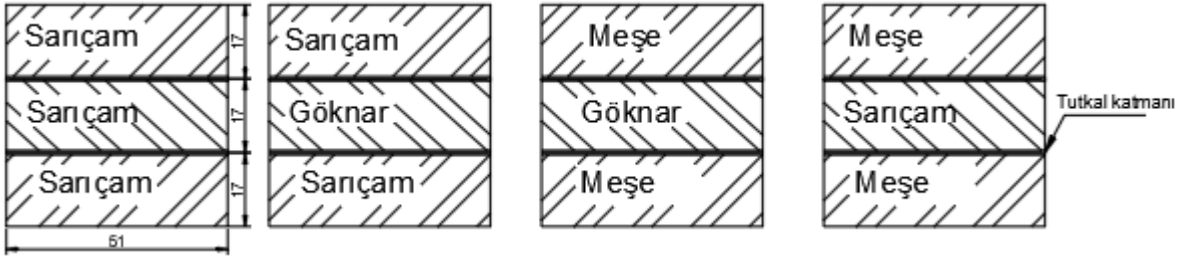
Lamine keresteyi oluşturan bileşenlere ait bazı fiziksel değerler

No	Malzeme Adı	Ebatları/Miktarı	Hava Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Rutubet Oranı (%)
1	Sarıçam ağacı	17 x 55 x 850 mm	0.59	% 11.6
2	Göknar ağacı	17 x 55 x 850 mm	0.44	% 11.3
3	Meşe ağacı	17 x 55 x 850 mm	0.75	% 12.4
	Malzeme Adı	Yüzeye Sürülme Miktarı	Yoğunluğu (g/cm ³)	
4	PVAc tutkalı	110-120 gr/m ²	1.1	
5	Poliüretan Tutkalı (PÜR)	180-220 gr/m ²	1.10	

2.2. Metot

2.2.1. Lamine Kerestelerin Üretilmesi

Lamine keresteleri oluşturan ağaç malzemeler, kaba ölçüleri; 21 mm x 60 mm x 850 mm ölçülerinde kesildikten sonra yüz ve cumba temizleme işlemi yapılarak net ölçüsü olan 17 mm x 55 mm x 850 mm ölçülerine getirilmiştir. Net ölçüsüne getirilen masif ahşap parçalar 20 °C sıcaklık ve %65 bağıl nem şartlarında iklimlendirme odasında değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar kondisyonlanmıştır. Kondisyonlanan masif parçalarının yüzeylerine gereken tutkallar (PVAc ve PÜR) sürülerek; Şekilde 1’deki kombinasyonlarda olacak şekilde preslenerek lamine keresteler elde edilmiştir. Presleme uygulamasında sarıçam kombinasyonu için 0.8 N/mm², meşe kombinasyonu için 1.3 N/mm² basınç değeri ayarlanıp 20 °C sıcaklıkta; tutkalın sertleşmesi için presleme süresi, PVAc tutkalı için 30 dakika, PÜR tutkalı için ise 60 dakika olacak şekilde ayarlanmıştır. Presleme işlemi tamamlanan lamine kerestelerin birer cumbaları rendelendikten sonra daire testere makinesinde; numune ölçüsü 51 mm x 51 mm x 820 mm ölçülerine getirilmiştir. Üç katmanlı ve farklı odun türlerinden elde edilen lamine kerestelere ait kombinasyon biçimleri Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Lamine kerestelere ait kombinasyon biçimleri

2.2.2 Lamine Kerestelerin Hava Kuruğu Yoğunluk Değerlerinin Tespiti

51 mm x 51 mm x 810 mm ebatlarındaki lamine kerestelerinin hava kuruğu yoğunluk değerlerinin tespiti TS 5497 EN 408 (2006)'e göre yapılmıştır. Bu standarda göre her kombinasyon grubundan 50 mm x 50 mm x 51 mm ölçüsünde ve 3'er adet olmak üzere toplamda 24 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri 20 ± 2 °C sıcaklık ve %65 bağıl nem şartlarında %12 rutubet oranına ulaşmaya kadar kondisyonlanmıştır. Kondisyonlanma 6 saat aralıklarla yapılan ölçümlerde iki tartım arasında kütlece 0.001'den fazla olmadığı zaman numunelerin sabit ağırlığa geldiği kabul edilmektedir. Deney numunelerinin iklimlendirme kabini içinde kondisyonlanmasına ait görüntü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Lamine keresteleri iklimlendirme kabini içinde kondisyonlanması

2.2.3 Statik Eğilme Direnci ve Eğilmede Elastikiyet Modülünün Tespiti

Yapılan çalışmada 20 ± 2 °C sıcaklık ve %65 bağıl nem şartlarında kondisyonlanan lamine kerestelerin eğilme dirençleri ve eğilmede elastikiyet modüllerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen testler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Ağaçşileri Endüstri Mühendisliği Bölümü test laboratuvarında bulunan Instron markalı universal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Eğilme direnci deneylerinde, masif ağaç malzemeler için TS ISO 13061 - 3'te belirtilen esaslara uyulmuştur. Deney numuneleri, 51 mm x 51 mm x 810 mm ölçülerinde olup 3'er adet hazırlanmıştır. Ayrıca eğilme deneylerinde TS ISO 13061 - 4'teki esaslara göre eğilmede elastikiyet modülü değerleri de tespit edilmiştir. Eğilme direnci testinde mesnetler arası mesafe 760 mm, kuvvet uygulaması ise dakikada 10 mm ayarlanıp tutkal hattına dik pozisyonda uygulanmıştır. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülünün belirlenmesine yönelik yapılan deneylere ait resimler Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülünün tespiti; (a) ve (b) Statik eğilme deney düzeneği, (c) Statik eğilme deney sonrası numuneler

2.2.4. Verilerin Analiz Edilmesi

Deneysel metotlarla elde edilen verilerin analiz edilmesinde SPSS 26 ve MSTAT-C programları tercih edilmiştir. Bu programlar ile çok yönlü varyans analizi (MANOVA) ve çoklu karşılaştırmalar %95 güven endeksi esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1.1. Hava Kurusu Yoğunluk Değerlerinin Belirtilmesi

TS 5497 EN 408 No'lu standarda göre hazırlanan deney numuneleri 20 ± 2 °C sıcaklık ve %65 bağıl nem şartlarında 6 saat aralıklarla yapılan ağırlık ölçümlerinde değişmez kütleye ulaştıkları andaki lamine kerestelerin hava kurusu yoğunluk değerlerine ilişkin istatistiksel veriler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2

Lamine kerestelerin hava kurusu yoğunluk (g/cm^3) değerlerine ilişkin istatistiksel veriler

Dış Katman	İç Katman	Tutkal Türü	N	X_{min}	X_{max}	X_{ort}	Std. sp.
Sarıçam	Sarıçam	PÜR	3	0.551	0.597	0.569	0.025
		PVAc	3	0.603	0.613	0.608	0.005
	Gök nar	PÜR	3	0.540	0.547	0.543	0.004
		PVAc	3	0.482	0.556	0.511	0.040
Meşe	Sarıçam	PÜR	3	0.629	0.724	0.692	0.054
		PVAc	3	0.613	0.732	0.653	0.068
	Gök nar	PÜR	3	0.653	0.777	0.711	0.062
		PVAc	3	0.600	0.665	0.629	0.033

Tablo 2'ye göre lamine kerestelerin hava kurusu yoğunluk değerlerinin birbirlerinden farklı oldukları tespit edilmiştir. Tespit edilen hava kurusu yoğunluk değerlerinin birbirlerinden anlamlı düzeyde farklı olup ya da olmadıklarını belirlemek için çok yönlü varyans analizi yapılmıştır. Lamine kerestelerin hava kurusu yoğunluk değerlerine ilişkin çok yönlü (MANOVA) varyans analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir

Tablo 3'teki lamine kerestelerin çok yönlü varyans analiz sonuçlarına göre sadece dış katmanda kullanılan odun türünün etkisinin anlamlı ($p < 0.05$; $F: 41.495$) olduğu; etki düzeyinin ise yüksek (%72.2) olduğu tespit edilmiştir. İç katmanda kullanılan odun türü ve tutkal türünün lamine kerestelerin hava kurusu yoğunluk değerlerine olan tekli etkileri ile lamine keresteyi meydana getiren her üç faktörün ikili ve üçlü etkileşimlerinin etki düzeylerinin anlamlı olmadığı tespit edilmiştir. Varyans analiz çizelgesine göre lamine kerestelerin hava kurusu yoğunluk değerlerine etkisi anlamlı tespit edilen dış katman faktörüne ait gruplar arasındaki farklılığı belirlemek için Duncan testi yapılarak gruplar arasındaki homojenlik değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3

Lamine kerestelerin hava kurusu yoğunluk değerlerine ilişkin çok yönlü varyans analiz sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Top- lamı	SD	Kareler Ort.	F	Anlamlılık Düzeyi (p<0.05)	Kısmi Eta ²
Dış Katman (A)	0.077	1	0.077	41.495	0.000	0.722
İç Katman (B)	0.006	1	0.006	3.314	0.087	0.172
Tutkal Türü (C)	0.005	1	0.005	2.572	0.128	0.138
A*B	0.005	1	0.005	2.777	0.115	0.148
A*C	0.006	1	0.006	3.237	0.091	0.168
B*C	0.005	1	0.005	2.676	0.121	0.143
A*B*C	0.000	1	0.000	0.161	0.694	0.010
Hata	0.030	16	0.002			
Toplam	9.196	24				
Düzeltilmiş Toplam	0.134	23				

Tablo 4

Hava kurusu yoğunluk değerlerine etkisi anlamlı olan dış katmana ait homojenlik grupları

İç Katman	\bar{X} (g/cm ³)	HG
Meşe	0.671	A
Sarıçam	0.558	B

LSD: 0.063 g/cm³

Duncan testine göre dış katmanda kullanılan odun türüne ait meşe odununa bağlı olarak tespit edilen hava kurusu yoğunluk değerinin (0.671 g/cm³) sarıçam odununa göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonucun meşe odununun yoğunluk değerinin yüksekliğinden dolayı gerçekleştiği söylenilebilir.

3.1. Statik Eğilme Direncinin Tespiti

TS ISO 13061 - 3'e göre deneysel yöntemlerle tespit edilen lamine kerestelerin statik eğilme dirençlerine ilişkin istatistiksel veriler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5

Lamine kerestelerin statik eğilme dirençlerine (N/mm²) ilişkin istatistiksel veriler

Dış Katman	İç Katman	Tutkal Türü	N	X_{min}	X_{max}	$X_{ort.}$	Std. sp.
Sarıçam	Sarıçam	PÜR	3	63.39	80.74	71.47	8.74
		PVAc	3	62.89	81.11	72.79	9.21
	Gök nar	PÜR	3	58.28	69.66	64.55	5.78
		PVAc	3	43.8	69.65	56.68	12.93
Meşe	Sarıçam	PÜR	3	68.07	87.41	77.35	9.69
		PVAc	3	61.95	99.63	76.52	20.24
	Gök nar	PÜR	3	31.92	83.36	63.24	27.49
		PVAc	3	46.11	60.51	54.60	7.54

Tablo 5'te verilen lamine kerestelerin statik eğilme dirençlerine ilişkin tespit edilen değerlerin birbirlerinden farklı oldukları görülmüştür. Çizelgeye göre özellikle dış katmanı meşe odunundan, sarıçam iç katmanlı ve poliüretan tutkalı ile elde edilen lamine kerestenin statik eğilme (77.35 N/mm²) direncinin; diğer kombinasyonlarda üretilmiş olan lamine kerestelerin statik eğilme dirençlerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmadaki bütün kombinasyonlar için elde edilen lamine kerestelerin statik eğilme dirençleri arasındaki farklılıkların %5 hata payı dâhilinde anlamlılık seviyelerini tespit etmek için çok yönlü varyans analizi yapılarak; sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6

Lamine kerestelerin statik eğilme dirençlerine ait çoklu varyans analizi

Varyans Kaynağı	Kareler Top- lamı	SD	Kareler Ort.	F	Anlamlılık Düzeyi (p<0.05)	Kısmi Eta ²
Dış Katman (A)	14.555	1	14.555	0.069	0.796	0.004
İç Katman (B)	1307.588	1	1307.588	6.235	0.024	0.280
Tutkal Türü (C)	96.360	1	96.360	0.459	0.508	0.028
A*B	63.408	1	63.408	0.302	0.590	0.019
A*C	3.190	1	3.190	0.015	0.903	0.001
B*C	108.333	1	108.333	0.517	0.483	0.031
A*B*C	0.718	1	0.718	0.003	0.954	0.000
Hata	33550.591	16	209.724			
Toplam	113172.711	24				
Düzeltilmiş Toplam	4949.742	23				

Tablo 6'ya göre; farklı kombinasyonlarda elde edilen lamine kerestelerin üretilmesine dâhil edilen faktörlerden sadece iç katman faktörünün etkisinin anlamlı (F:6.325; P<0.05) olduğu tespit edilmiştir. Etkisi anlamlı olan iç katman faktörünün etki düzeyinin %28 olduğu tespit edilmiştir. Varyans analiz çizelgesine göre lamine kerestelerin statik eğilme direncine etkisi anlamlı tespit edilen iç katman faktörüne ait gruplar arasındaki farklılığı belirlemek için Duncan testi yapılarak gruplar arasındaki homojenlik değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7

Statik eğilme direncine etkisi anlamlı olan iç katmana ait homojenlik grupları

İç Katman	\bar{X} (N/mm ²)	HG
Sarıçam	74.53	A
Gökmar	59.77	B

LSD: 12.23 N/mm²; HG: Homojenlik grupları

Tablo 7'ye göre, lamine kerestelerin statik eğilme dirençlerine etkisi anlamlı olarak tespit edilen iç katman faktörünün teşekkülünde kullanılan sarıçam ve gökmar odunları arasında anlamlı bir farkın olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analiz sonucuna göre sarıçam odununun statik eğilme direncinin gökmar odununa göre daha yüksek olduğu; bu yüksekliğin ise sarıçam odun türünün yoğunluk değerine bağlı olarak gerçekleştiği söylenebilir. Çünkü yapılan bu çalışmada sarıçam odununun yoğunluğu 0.59 g/cm³ iken gökmar odununda bu değer 0.44 g/cm³ olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde gökmar odununun yoğunluk değerinin 0.43 g/cm³ (Göker ve Bozkurt, 1996) olduğu sarıçam odununun yoğunluk değerleri ise 0.50 g/cm³ ile 0.62 g/cm³ (Yapıcı vd., 2013; Özcan vd., 2017) arasında olduğu belirlenmiştir. Statik eğilme dirençleri; sarıçamda 81.82 N/mm² (Yapıcı vd., 2013) iken gökmar odununda ise 53.50 N/mm² (Özçifçi ve Batan, 2009) olduğu belirlenmiştir. Sarıçam lamine kerestelerde tutkal hattına dik yöndeki statik eğilme direncinin 79.7 N/mm² (Kasal vd., 2010) olduğunu, gökmar odunundan PVAc tutkalı ile oluşturulan lamine kerestenin statik eğilme direncinin 71.2 N/mm², PÜR tutkalı ile oluşturulan lamine kerestenin statik eğilme direncinin ise 40.8 N/mm² olduğunu belirtmişlerdir (Zor vd., 2016). Ayrıca yapılan çalışmalarda farklı odun türleri (Kayın, meşe, sarıçam ve kavak) kullanılarak elde edilmiş farklı kombinasyonlardaki lamine edilmiş kerestelerin statik eğilme dirençlerinin 76.14 N/mm²'den 107.52 N/mm²'ye kadar değiştiğini (Keskin, 2004; Keskin ve Togay, 2003) belirtmişlerdir. Yapılan diğer çalışmalarda ise limba ve akoume gibi odun türlerinden elde edilen lamine kerestelerin statik eğilme dirençlerinin sırasıyla 51 N/mm², 58.5 N/mm² (Ekundayo vd., 2022) olduğu, Avrupa Ladin'inden elde edilen lamine kerestelerin statik eğilme direncinin ise 81.63 N/mm² (Reinprecht vd., 2022) olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan bu çalışmada ise statik eğilme direnci testlerine tabi tutulan lamine kerestelerin tespit edilen statik eğilme direnci değerlerinin, literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla benzer oranlarda olduğu tespit edilmiştir.

3.2. Eğilmede Elastikiyet Modülünün Tespiti

Farklı kombinasyonlarda üretilen lamine kerestelerin TS ISO 13061 - 4'e göre eğilmede elastikiyet modülü değerlerine ilişkin istatistiksel veriler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8

Lamine kerestelerin eğilmede elastikiyet modülü (N/mm²) değerlerine ilişkin istatistiksel veriler

Dış Katman	İç Katman	Tutkal Türü	N	X_{min}	X_{max}	X_{ort}	Std. sp.
Sarıçam	Sarıçam	PÜR	3	9778.14	10443.83	10016.99	370.53
		PVAc	3	9959.45	11056.22	10550.78	553.41
	Gök nar	PÜR	3	8543.54	9879.89	9375.01	725.57
		PVAc	3	5451.7	10687.19	7941.48	2627.11
Meşe	Sarıçam	PÜR	3	7687.43	12562.89	9696.01	2548.53
		PVAc	3	7139.77	12095.5	9262.90	2552.90
	Gök nar	PÜR	3	7483.51	10684.99	8835.49	1657.71
		PVAc	3	5669.44	7546.54	6761.32	975.40

Tablo 8'e göre lamine kerestelerin eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin birbirlerinden farklı oldukları görülmüştür. Çizelgeye göre özellikle hem dış katmanı ve hem de iç katmanı sarıçam odunundan, PVAc tutkalı kullanılarak üretilen lamine kerestenin eğilmede elastikiyet modülünün (10550.78 N/mm²) diğer kombinasyonlarda üretilmiş olan lamine kerestelerin eğilmede elastikiyet modüllerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan bu çalışmada üretilen tüm kombinasyonlardaki lamine kerestelerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri arasındaki farklılıkların %5 hata payı dâhilinde anlamlılık seviyelerini tespit etmek için çok yönlü varyans analizi yapılarak; sonuçları Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9

Lamine kerestelerin eğilmede elastikiyet modülü değerlerine ilişkin çoklu varyans analizi

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ort.	F	Anlamlılık Düzeyi (p<0.05)	Kısmi Eta ²
Dış Katman (A)	4154700.271	1	4154700.271	1.352	0.262	0.078
İç Katman (B)	16401347.735	1	16401347.735	5.337	0.035	0.250
Tutkal Türü (C)	4352893.928	1	4352893.928	1.417	0.251	0.081
A*B	4606.233	1	4606.233	0.001	0.970	0.000
A*C	969073.338	1	969073.338	0.315	0.582	0.019
B*C	4882643.313	1	4882643.313	1.589	0.226	0.090
A*B*C	39917.911	1	39917.911	0.013	0.911	0.001
Hata	49166974.156	16	3072935.885			
Toplam	2047804213.585	24				
Düzeltilmiş Toplam	79972156.884	23				

Tablo 9'a göre; farklı kombinasyonlarda elde edilen lamine kerestelerin üretilmesine dâhil edilen faktörlerden sadece iç katman faktörünün etkisinin anlamlı (F:5.337; P<0.05) olduğu tespit edilmiştir. Etkisi anlamlı olan iç faktörünün etki düzeyinin %25 olduğu tespit edilmiştir. Varyans analiz çizelgesine göre etkisi anlamlı tespit edilen iç katman faktörüne ait gruplar arasındaki farklılığı belirlemek için Duncan testi yapılarak gruplar arasındaki homojenlik değerleri Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10

Eğilmede elastikiyet modülüne etkisi anlamlı olan iç katmana ait homojenlik grupları

İç Katman	\bar{X} (N/mm ²)	HG
Sarıçam	9882.00	A
Gök nar	8228.00	B

LSD: 1480 N/mm²; HG: Homojenlik grupları

Tablo 10'a göre, lamine kerestelerin eğilmede elastikiyet modülüne etkisi anlamlı olarak tespit edilen iç katman faktörünün teşekkülünde kullanılan sarıçam ve göknar odunları arasında anlamlı bir farkın olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analiz sonucuna göre sarıçam odununun eğilmede elastikiyet modülünün göknar odununa göre daha yüksek olduğu; bu yüksekliğin ise sarıçam odun türünün yoğunluk değerinin yüksekliğinin bir sonucu olarak gerçekleştiği söylenebilir.

Literatürde yapılan çalışmalarda sarıçam odununun hava kuru yoğunluk değerinin 0.51 g/cm^3 iken lamine edilmiş sarıçam kerestelerde hava kuru yoğunluk değerinin 0.54 g/cm^3 olduğu; sarıçam odununun liflere dik yöndeki eğilmede elastikiyet modülü değerinin 10200 N/mm^2 iken lamine edilmiş sarıçam kerestelerde ise bu değer 10354.87 N/mm^2 (Kurt vd., 2003) olduğunu tespit etmişlerdir. Göknar odununda ise yoğunluk değerinin 0.43 g/cm^3 (Erdin ve Bozkurt, 2013) olduğu, eğilmede elastikiyet modülü değerinin ise 7870.50 N/mm^2 (Özçifçi ve Batan, 2009) olduğu; bir diğer çalışmada sarıçam odunundan elde edilen lamine kerestelerin eğilmede elastikiyet modülünün 8566 N/mm^2 (Shim vd., 2009) olduğunu belirtmişlerdir. Daha önce yapılmış olan çalışmalardaki sonuçlardan anlaşılmaktadır ki; yapılan bu çalışmada elde edilen eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin literatürde yapılan çalışmalardaki değerlerle benzer oranlarda olduğu tespit edilmiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

Yapılan çalışmada odun türü, tutkal çeşidi gibi farklı kombinasyonlarda üretilen lamine kerestelerin hava kuru yoğunluk değerleri, statik eğilme dirençleri ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri deneysel yöntemlerle belirlenirken odun türünün, tutkal çeşidini etkileri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Lamine kerestelerin dış katmanlarında kullanılan meşe odununa bağlı olarak gerçekleşen statik eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin sarıçam odununa göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak meşe odunu ve sarıçam odunu arasında tespit edilen bu farklılığın istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmüştür. Bundan dolayı lamine kerestelerin dış katmanlarında sarıçam daha ekonomik olduğu için kullanılabilir.
- Lamine kerestelerin üretilmesinde kullanılan diğer bir parametre olan tutkal çeşidinin lamine kerestelerin eğilme dirençleri ve eğilmede elastikiyet modülüne etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı tespit edilmiştir. Fakat polivinil asetat (PVAc) tutkalının sadece sarıçam kombinasyonu ile üretilen lamine kerestenin hem statik eğilme direnci ve hem de eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde poliüretan (PÜR) tutkalına göre daha yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak sarıçam kombinasyonu haricindeki diğer tüm lamine kereste kombinasyonlarında, poliüretan (PÜR) tutkalına bağlı gerçekleşen eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bundan sonra yapılacak çalışmalarda; eğer lamine keresteler iç mekânlarda kullanılacaksa birim fiyatının daha düşük olmasından dolayı polivinil asetat (PVAc) tutkalının kullanılması önerilebilir. Şayet lamine keresteler dış mekânlarda kullanılacaksa dış hava koşullarına dayanıklı poliüretan (PÜR) tutkal türlerinin seçilmesi önerilir.
- Lamine kerestelerin iç katmanlarını oluşturan sarıçam ve göknar odunlarının; lamine kerestelerin statik eğilme ve eğilmede elastikiyet modülüne olan etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı oldukları; sarıçam odununa bağlı olarak gerçekleşen statik eğilme dirençleri ve eğilmede elastikiyet modüllerinin göknar odununa göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmada elde edilen tüm bu bulgulara göre; üretimi önerilebilecek lamine kereste kombinasyonu; dış katman sarıçam, iç katman sarıçam ya da göknar odunu ile birlikte poliüretan tutkalı şeklinde bir kombinasyon önerilebilir. Ayrıca meşe, sarıçam ve göknar odunları ile oluşturulacak farklı kombinasyonlardaki lamine kerestelerin üretilmesinde, sarıçam ve göknar odunlarının tercih edilerek oluşturulması; bununla birlikte özellikle yapışma dirençleri daha yüksek ve dış hava koşullarına daha dayanıklı olan fenol formaldehit, melamin formaldehit ve poliüretan esaslı tutkalların kullanılarak elde edilen lamine kerestelerin mekanik dirençlerinin araştırılması önerilir.

Yazar Katkıları

Musa KAYA: Analizin yapılması, verilerin yorumlanması, makalenin yazılması.

Ramazan BÜLBÜL: Verilerin elde edilmesi, çalışmanın düzenlenmesi, makalenin yazılması.

Hasan Özgür İMİRZİ: Çalışma konusunun seçilmesi, verilerin yorumlanması.

Nihat DÖNGEL: Makalenin yazılması, verilerin yorumlanması.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları; aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmiştir.

Kaynaklar

- Alici, N., Dalkılıç, B. (2022). İç mekân donatı elemanlarında biyo-esaslı malzeme kullanımı. *GRID - Architecture Planning and Design Journal*, 5(2), 325-346.
- Çavuş, V., Bal, B. C. (2023). Parmak birleştirmeli kereste (Finger-Jointed Lumber). *Tarım, Orman ve Su Bilimlerinde Güncel Yaklaşımlar*, 519-532.
- Dilik, T. (1997). Lamine Ağaç Malzemeden Pencere Profili Üretimi ve Bazı Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi (Doktora tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Dündar, T., Kaymakçı, A. ve Aydoğmuş, A. (2016). Pavlonya Odununun Tutkallı Lamine Kereste Üretiminde Orta Tabakada Kullanım Olanakları. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 16(2), 536-540.
- Ekundayo, O. O., Arum, C., Owoyemi, J. M. (2022). Bending Strength Evaluation of Glulam Beams Made from Selected Nigerian Wood Species. *International Journal of Engineering*, 35(11), 2120-2129.
- Erdin, N., Bozkurt, Y. (2013). Odun Anatomisi, 2. Baskı, *İstanbul Üniversitesi Yayınları*. İstanbul
- Göker, Y. ve Bozkurt, A.Y., (1996). "Fiziksel ve mekanik ağaç teknolojisi", İstanbul Üniversitesi Yayınları, İstanbul, Yayın No: 3944, 374.
- Issa, C. A., Kmeid, Z. (2005). Advanced wood engineering: glulam beams. *Construction and Building Materials*, 19(2), 99-106.
- Karayılmazlar, S., Çabuk, Y., Atmaca, A. ve Aşkın, A. (2007). Orman ürünleri endüstrisinde laminasyon tekniği ve önemi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 9(11), 78-86.
- Kasal, A., Efe, H. Dizel, T. (2010). Masif ve Lamine Edilmiş Ağaç Malzemelerde Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülünün Belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 13(3), 183-190.
- Keskin, H. (2004). Sapsız Meşe (*quercus petraea* L.) ve Sarıçam (*pinus sylvestris lipsky*) Kombinasyonu İle Üretilmiş Lamine Ağaç Malzemelerin Bazı Teknolojik Özellikleri Ve Kullanım İmkânları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17(4):121-131.
- Keskin, H., Togay, A., (2003). "Doğu Kayını ve Karakavak Kombinasyonu ile Üretilmiş Lamine Ağaç Malzemelerin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri". *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 2,101-114.
- Kitek K., M., Oblak, L., Vratuša, S. (2010). Glued laminated timber in architecture. *Drvna industrija*, 61(3), 197-204.
- Klippel, M., Frangi, A., Fontana, M. (2011). Influence of the adhesive on the load-carrying capacity of glued laminated timber members in fire. *Fire Safety Science*, 10, 1219-1232.
- Kurt, R., Keskin, H., Atar, M. (2003). Lamine edilmiş sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 6(1).
- Marra, G. (1984). The role of adhesion and adhesives in the wood products industry R.H. Gillespie (Ed.), *Adhesives for Wood. Research Applications, and Needs*. USDA Forest Serv, Forest Prod. Lab., Madison, WI pp. 2-9
- Mengeloğlu, F., Kurt, R. (2004). Mühendislik ürünü ağaç malzemeler 1 tabakalanmış kaplama kereste (TAK) ve tabakalanmış ağaç malzeme (TAM). *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 39-44.
- Özan, Z. E., Onat, S. M., Aydemir, D. (2017). Sarıçam ve uludağ göknar odunlarının bazı özellikleri üzerine termal muamelenin etkileri. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19(1), 187-193.
- Özçifçi, A., Batan, F. (2009). Bor Yağının Ağaç Malzemenin Bazı Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 12(4), 287-292.
- Özlüsoyulu, İ., İstek, A. (2018). Ağaç kabuklarının izolasyon levha üretiminde değerlendirilmesi. In *4th International Congress on Multidisciplinary Studies*. Girne, KKTC (pp. 401-411).
- Reinprecht, L., Ciglian, D., Iždinský, J., Sedliačik, J. (2022). Effect of primary spruce lamella aging on the bending characteristics of glulam beams. *Applied Sciences*, 12(24), 12872.
- Shim, K. B., Kim, K. M., Park, J. S. (2009). Improvement of prediction accuracy of glulam modulus of

- elasticity by considering neutral axis shift in bending. *Wood and Fiber Science*, 90-96.
- Svatoš-Ražnjević, H., Orozco, L., Menges, A. (2022). Advanced timber construction industry: A review of 350 multi-storey timber projects from 2000–2021, *Buildings*, 12 (4) 404,
- Şenay, A. (1996). Ahşap lamine taşıyıcı elemanların mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine araştırmalar, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Tokyay, V. (1998). Tutkallı tabakalı ahşap teknolojisi. *Yapı*, 197. 114
- TS 3842, (1983). Yapıştırılmış lamine ahşap yapı elemanları, TSE Standardı, Ankara, Ekim, 1–4.
- TSE, 5497. EN408. (2006). Ahşap Yapılar - Yapı Kerestesi Ve Tutkallanmış Lamine Kereste – Bazı Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS ISO 13061 - 4, (2021). Odunun statik eğilmede elastiklik modülünün tayini, Türkiye Standartlar Enstitüsü (TSE), Ankara.
- TS ISO 13061 - 3, (2021). Odunun statik eğilme dayanımının tayini, Türkiye Standartlar Enstitüsü (TSE), Ankara.
- Uysal B., Özçifçi A., Kurt Ş., Yapıcı F. (2005). Lamine malzemede su buharının boyutsal değişime etkisi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17 (4), 655-663.
- Yapıcı, F., Esen, R., Yörür, H., Likos, E. (2013). Isıl İşlemin Sarıçam Odununu Üzerinde Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Etkileri. *Technological Applied Sciences*, 8(1), 1-6.
- Yesügey, S.C., Karaman, Ö.Y., Güzel, N., (2014). Ahşap Malzemeli Konut Teknolojisi. Yalın Yayıncılık, İstanbul.
- Zor, M., Sözen, E., Bardak, T. (2016). Lamine ahşap malzemenin mekanik performansları ve görüntü analizi yöntemiyle eğilme direnci testinde deformasyonun belirlenmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 18(2), 126-136. <https://doi.org/10.24011/barofd.268576>