



**FARKLI DESTEK KATMANLARI İLE GÜÇLENDİRİLEREK LAMİNE
EDİLMİŞ AĞAÇ MALZEMENİN DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Hilal ULAŞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
AĞAÇİŞLERİ ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hilal ULAŞAN

26/12/2022

FARKLI DESTEK KATMANLARI İLE GÜÇLENDİRİLEREK LAMİNE EDİLMİŞ AĞAÇ MALZEMENİN DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hilal ULAŞAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2022

ÖZET

Bu çalışmada, karbon fiber kumaş, çelik tel örgü ve bambu kaplama ile güçlendirilerek lamine edilmiş ağaç malzemenin dayanım özellikleri belirlenmiştir. Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ve Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) ağaç malzemenin elde edilen lamellerin aralarına güçlendirme malzemesi (destek katmanı) yerleştirilerek ve güçlendirme malzemesi olmadan (kontrol) D4 normunda polivinilasetat (PVAc-D₄) ve poliüretan (Pol-D₄) tutkalları ile yapıştırılmıştır. 3 ve 5 katmanlı olarak elde edilen lamine ahşap örneklerin rutubet tayini TS EN 322; yoğunluk tayini TS EN 323; eğilme dayanımı, eğilmede elastikiyet modülü ve basınç dayanımı TS EN 408+A1; dinamik eğilme (şok) dayanımı TS 2477; makaslama dayanımı ise ASTM D 3110 esaslarına uygun olarak belirlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, en yüksek eğilme dayanımı (141,6 N/mm²), bambu kaplama ile güçlendirilen, Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan, 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde; en yüksek elastikiyet modülü (9095,98 N/mm²), bambu kaplama ile güçlendirilen, Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan, 3 katmanlı sarıçam örneklerde; En yüksek basınç dayanımı (62,8 N/mm²), karbon fiber kumaş ile güçlendirilen, Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan, 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde; en yüksek dinamik eğilme dayanımı değeri (110,8 kJ/m²), karbon fiber kumaş ile güçlendirilen, Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan, 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde; en yüksek makaslama dayanımı değeri (12,3 N/mm²), çelik tel örgü ile güçlendirilen, Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan, 3 katmanlı Doğu kayını örneklerde elde edilmiştir. Sonuç olarak, lamine ağaç malzemenin çeşitli yöntemlerle güçlendirilmesi dayanım üzerinde artırıcı etkiler yapmıştır. Buna göre mekanik özellikleri arttırmak için karbon fiber kumaş, bambu kaplama ve çelik tel örgü kullanımı önerilebilir.

Bilim Kodu : 120403

Anahtar Kelimeler : Ağaç malzeme, laminasyon, güçlendirme, dayanım, destek katmanı

Sayfa Adedi : 99

Danışman : Prof. Dr. Cevdet SÖĞÜTLÜ

DETERMINATION OF STRENGTH PROPERTIES OF LAMINATED WOOD
MATERIAL REINFORCED WITH DIFFERENT SUPPORT LAYERS

(M. Sc. Thesis)

Hilal ULAŞAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2022

ABSTRACT

In this study, the strength properties of wood material reinforced with carbon fiber fabric, steel wire mesh and bamboo veneer were determined. Polyvinylacetate (PVAc-D₄) and polyurethane (Pol-D₄) in D4 norm by placing reinforcement material (reinforcement layer) between the lamellas obtained from scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) and oriental beech (*Fagus orientalis* L.) wood material and without reinforcement material (control) glued together. Moisture determination of laminated wood samples obtained as 3 and 5 layers TS EN 322; density determination TS EN 323; bending strength, modulus of elasticity in bending, and compressive strength TS EN 408+A1; dynamic bending (shock) strength was determined in accordance with TS 2477, shear strength was determined in accordance with ASTM D 3110 principles. According to the results of the research, the highest bending strength (141.6 N/mm²) was obtained in 5-layered Eastern beech samples reinforced with bamboo veneer and bonded with Pol-D₄ glue; the highest modulus of elasticity (9095.98 N/mm²), in 3-layered Scotch pine specimens reinforced with bamboo veneer and bonded with Pol-D₄ glue; The highest compressive strength (62.8 N/mm²), 5-layer Eastern beech samples, reinforced with carbon fiber fabric and bonded with Pol-D₄ glue; The highest dynamic flexural strength value (110.8 kJ/m²) was found in 5-layer Eastern beech samples reinforced with carbon fiber fabric and bonded with Pol-D₄ glue; The highest shear strength value (12.3 N/mm²) was obtained in 3-layered oriental beech samples reinforced with steel wire mesh and bonded with Pol-D₄ glue. As a result, the reinforcement of laminated wood material with various methods has increased the strength. Accordingly, the use of carbon fiber fabric, bamboo veneer and steel wire mesh can be recommended to increase the mechanical properties.

Science Code : 120403

Key Words : Wood, lamination, reinforcement, strength, support layers

Page Number : 99

Supervisor : Prof. Dr. Cevdet SÖĞÜTLÜ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca, her konuda desteğini esirgemeyen ve bu süreçte değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Cevdet SÖĞÜTLÜ'ye, deney örneklerinin hazırlanması aşamasındaki yardımlarından dolayı bölümümüz uygulama atelyelerinde görevli tüm personele, fikir ve deneyimlerinden istifade etmiş olduğum Türk Standartları Enstitüsü, Yapı Malzemeleri Laboratuvarı Müdürlüğü, Ahşap ve Mobilya Bölüm Sorumlusu Orman Endüstri Mühendisi Hasan AKSU'ya, tez sürecimde göstermiş olduğu ilgi ve alaka için Arş. Gör. Yasemin ÖZTÜRK'e, tez yazımı konusunda yardım ve tecrübelerini esirgemeyen Türkçe Öğretmeni Orkun SEVİNÇ'e, bugüne kadar her konuda maddi ve manevi destekleri ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan sevgili babam Şerafettin ULAŞAN'a ve sevgili annem Nevin BİLGİN'e teşekkürü borç bilirim.

Bu tez çalışması Gazi Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi FYL-2021-6952 kodlu proje tarafından desteklenmiştir. Gazi Üniversitesi yöneticilerine ve BAP Koordinasyon Birimi çalışanlarına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Laminasyon.....	5
2.1.1. Laminasyonun avantajları	6
2.2. Güçlendirme.....	9
3. LİTERATÜR ÖZETİ	11
4. MALZEME VE YÖNTEM	17
4.1. Malzeme.....	17
4.1.1. Ağaç malzeme	17
4.1.2. Tutkal	17
4.1.3. Destek katmanı	19
4.2. Yöntem.....	21
4.2.1. Deney örneklerinin hazırlanması.....	23
4.2.2. Verilerin değerlendirilmesi.....	31

	Sayfa
5. BULGULAR.....	33
5.1. Yoğunluk Sonuçları.....	33
5.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları.....	35
5.3. Eğilmede Elastikiyet Modülü Sonuçları	46
5.5. Basınç Dayanımı Sonuçları	56
5.6. Dinamik Eğilme Dayanımı Sonuçları.....	65
5.7. Makaslama Dayanımı Tayini	76
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	98

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. PVAc-D ₄ tutkalın teknik özellikleri	18
Çizelge 4.2. Pol-D ₄ tutkalın teknik özellikleri	18
Çizelge 4.3. Bir deney için kullanılan deneme deseni	23
Çizelge 5.1. Yoğunluk değerleri (g/cm ³)	33
Çizelge 5.2. Eğilme dayanımı istatistiki değerleri (N/mm ²).....	36
Çizelge 5.3. Eğilme dayanımına ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanlarının etkisine ilişkin varyans analizi sonuçları	38
Çizelge 5.4. Ağaç türü–tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	39
Çizelge 5.5. Ağaç türü–katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²).....	39
Çizelge 5.6. Tutkal çeşidi–katman sayısı düzeyinde homojenlik testi Duncan testi (N/mm ²)	40
Çizelge 5.7. Ağaç türü–tutkal çeşidi–katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²) .	40
Çizelge 5.8. Destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²).....	41
Çizelge 5.9. Ağaç türü–destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²).....	41
Çizelge 5.10. Tutkal çeşidi–destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²).....	42
Çizelge 5.11. Ağaç türü–tutkal çeşidi–destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²).....	42
Çizelge 5.12. Katman sayısı–destek katmanı homojenlik Duncan testi (N/mm ²).....	43
Çizelge 5.13. Ağaç türü–katman sayısı–destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²).....	43
Çizelge 5.14. Tutkal çeşidi–katman sayısı–destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²).....	44
Çizelge 5.15. Ağaç türü–tutkal çeşidi–katman sayısı–destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	44
Çizelge 5.16. Eğilme dayanımı bakımından masife kıyasla değişim yüzdeleri (%).....	46
Çizelge 5.17. Eğilmede elastikiyet modülü istatistiki değerleri (N/mm ²)	47

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.18. Eğilmede elastikiyet modülüne ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanlarının etkisine ilişkin varyans analizi sonuçları	49
Çizelge 5.19. Ağaç türü-tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	50
Çizelge 5.20. Ağaç türü-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	50
Çizelge 5.21. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²). ..	51
Çizelge 5.22. Destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	51
Çizelge 5.23. Ağaç türü-destek düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	52
Çizelge 5.24. Tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	52
Çizelge 5.25. Katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	53
Çizelge 5.26. Ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	53
Çizelge 5.27. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	54
Çizelge 5.28. Eğilmede elastikiyet modülü bakımından masife kıyasla değişim yüzdeleri (%)	56
Çizelge 5.29. Basınç dayanımı istatistiki değerleri (N/mm ²)	57
Çizelge 5.30. Basınç dayanımına ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanlarının etkisine ilişkin varyans analizi sonuçları	59
Çizelge 5.31. Ağaç türü-tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	60
Çizelge 5.32. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²). ..	60
Çizelge 5.33. Destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	61
Çizelge 5.34. Ağaç türü-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	61
Çizelge 5.35. Tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	62
Çizelge 5.36. Ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	62
Çizelge 5.37. Katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	63
Çizelge 5.38. Ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	63

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.39. Tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm^2)	64
Çizelge 5.40. Basınç dayanımı bakımından masife kıyasla değişim yüzdeleri (%)	65
Çizelge 5.41. Dinamik eğilme dayanımı istatistiki değerleri (kJ/m^2)	66
Çizelge 5.42. Dinamik eğilme dayanımına ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanlarının etkisine ilişkin varyans analizi sonuçları	68
Çizelge 5.43. Ağaç türü-tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi (kJ/m^2).....	69
Çizelge 5.44. Ağaç türü-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (kJ/m^2)	69
Çizelge 5.45. Tutkal çeşidi-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (kJ/m^2).....	70
Çizelge 5.46. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (kJ/m^2)....	70
Çizelge 5.47. Destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kJ/m^2).....	71
Çizelge 5.48. Ağaç türü-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kJ/m^2)	71
Çizelge 5.49. Tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kJ/m^2)	72
Çizelge 5.50. Ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kJ/m^2) .	72
Çizelge 5.51. Katman sayısı-destek katmanı düzeyinde homojenlik testi Duncan testi (kJ/m^2)	73
Çizelge 5.52. Ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kJ/m^2)	73
Çizelge 5.53. Tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kJ/m^2)	74
Çizelge 5.54. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kJ/m^2).....	74
Çizelge 5.55. Dinamik eğilme dayanımı bakımından masife kıyasla değişim yüzdeleri (%).....	76
Çizelge 5.56. Makaslama dayanımı istatistiki değerleri (N/mm^2)	77
Çizelge 5.57. Makaslama dayanımına ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanlarının etkisine ilişkin varyans analizi sonuçları	79
Çizelge 5.58. Ağaç türü-tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi (N/mm^2).....	80

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.59. Ağaç türü – katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²).....	80
Çizelge 5.60. Tutkal çeşidi-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²).....	81
Çizelge 5.61. Destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²).....	81
Çizelge 5.62. Ağaç türü-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	82
Çizelge 5.63. Tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	82
Çizelge 5.64. Ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	83
Çizelge 5.65. Katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	83
Çizelge 5.66. Tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi karşılaştırma sonuçları	84
Çizelge 5.67. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm ²)	84
Çizelge 5.68. Makaslama dayanımı bakımından masife kıyasla değişim yüzdeleri (%)	86

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Destek elemanlı 3 ve 5 katmanlı uygulama örneği.....	22
Şekil 4.2. Rutubet tayini deney örneği.....	24
Şekil 4.3. Yoğunluk tayini deney örneği	25
Şekil 4.4. Eğilme dayanımı deney örneği	26
Şekil 4.5. Makaslama dayanımı deney örneği	30
Şekil 5.1. Yoğunluk değerleri (g/cm^3)	35
Şekil 5.2. Eğilme dayanımı değerleri (N/mm^2)	45
Şekil 5.3. Eğilmede elastikiyet modülü değerleri (N/mm^2).....	55
Şekil 5.4. Basınç dayanımı değerleri (N/mm^2)	64
Şekil 5.5. Dinamik eğilme dayanımı değerleri (kJ/m^2).....	75
Şekil 5.6. Makaslama dayanımı değerleri (N/mm^2).....	85

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Tall Tree Sağlık Merkezi, Victoria.....	6
Resim 2.2. Ulusal Tayvan Üniversitesi tarafından yapılan GLULAM köprü	8
Resim 2.3. Cambridge Üniversitesi, Eğitim Fakültesi	8
Resim 2.4. FRP ile güçlendirme uygulaması örneği	9
Resim 4.1. Bambu kaplama	19
Resim 4.2. Çelik tel örgü.....	20
Resim 4.3. Karbon fiber kumaş	21
Resim 4.4. Sarıçam, poliüretan tutkal, karbon fiber kumaş kombinasyonu.....	22
Resim 4.5. Deney örneklerinin deneylerden önce kondisyonlanması (a, b).....	24
Resim 4.6. Eğilmede elastikiyet modülü deney düzeneği.....	27
Resim 4.7. Basınç dayanımı deney düzeneği.....	28
Resim 4.8. Dinamik eğilme dayanımı deneyi düzeneği	29
Resim 4.9. Makaslama dayanımı deney düzeneği.....	31
Resim 6.1. Karbon fiber kumaş destek katmanlı örnekte deformasyon durumu	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Kuvvetin uygulandığı enine kesit alanı, (mm ²)
a	Yüklemeye noktası ile en yakın mesnet mesafesi
B	Enine kesit genişliği, mm
b_1, b_2	Deney örneği boyutları
cm	Santimetre
cm ³	Santimetreküp
°C	Santigrat derece
D	Yoğunluk
E	Elastikiyet modülü
$f_{c,0}$	Basınç dayanımı
f_m	Eğilme dayanımı
F_{max}	Maksimum yük (N)
$F_2 - F_1$	Yük deformasyon eğrisinin üzerindeki yük artışı
g/m ²	Gram/metrekare
g/cm ³	Gram/santimetreküp
H	Rutubet miktarı
h_1	Kalınlık
kg	Kilogram
kj	Kilo joule
l	Uzunluk
l_2	Örnek kalınlığının 16 katı (mm)
m	Metre
m	Kütle
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
m_H	Deney örneği kütlesi (g)

Simgeler	Açıklamalar
mm	Milimetre
mm ²	Milimetrekaire
mm/dk	Milimetre/dakika
m_o	Deney örneğinin kurutma sonrası kütlesi (g)
Mpa	Megapaskal
µm	Mikrometre, mikron
N/mm ²	Newton/milimetrekaire
S	Saniye
t	Kalınlık
w	Sehim
$W_2 - W_1$	$F_2 - F_1$ 'e karşılık gelen deformasyondaki artış
w	Harcanan enerji, kg.m
$\bar{x}$	Aritmetik ortalama
σ_{DE}	Odunun çarpmada eğilme dayanımı
σ_m	Makaslama dayanımı
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS EN	British Standards European Standards
CFRP	Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
CRP	Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
DIN	Deutsches Institut für Normung
FF	Fenolformaldehit
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
GLULAM	Glued Laminated Timber
HG	Homojenlik Grubu
ISO	International Organization for Standardization
LBL	Laminated Bamboo Lumber
MOE	Eğilmede Elastikiyet Modülü
MOR	Eğilme Direnci
Pol	Poliüretan
PU	Poliüretan
PUR	Poliüretan

Kısaltmalar**Açıklamalar****PVAc**

Polivinilasetat

SS

Liflere paralel yapışma direnci

TS EN

Turkish Standards European Standards

TSE

Türk Standartları Enstitüsü

UF

Üre-formaldehit

LSD

Least Significant Difference

Maks

Maksimum

Min

Minimum

1. GİRİŞ

Ağaç malzeme, insanlık tarih boyunca savunmadan barınmaya, günlük kullanım eşyası üretiminden büyük yapıların inşasına kadar çok geniş bir yelpazede tercih edilen bir malzeme olmuştur.

Ağaç malzemenin üstün özellikleri yanında geniş kullanım alanına sahip olması; anatomik yapısı, fiziksel ve mekanik özellikleri, kimyasal bileşimi ile ilgilidir. Ağaç malzeme, yoğunluğunun düşük olmasına karşın direncinin yüksek olması, yüksek taşıma gücüne sahip olması, el aletleri ve ağaç işleme makineleri ile kolay şekilde işlenebilmesi ve işleme sırasında düşük enerji tüketimi gereksinimi, çivilenme kabiliyetinin ve vida tutma özelliğinin yüksek olması, istenilen seviyede akustik değerlere bezenebilmesi ve kaynağının yenilenebilir olması gibi özellikleri sayesinde, iç ve dış dekorasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Usta, 2015; Söğütü, Nzokou, Koc, Tutgun ve Döngel, 2016; Kopac ve Sali, 2003).

Ağaç malzemenin üstün özelliklerine karşın, etkileri büyük oranda azaltılabilir olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. Ateş karşısında tutuşarak yanabilir, böcek ve mantar gibi zararlıların tahribatına maruz kalabilir, higroskopik yapısına bağlı olarak adsorpsiyon ve absorpsiyon döngüsü nedeniyle boyutsal ölçülerinde değişimler meydana gelebilir, elde edildiği ağacın şekli, yapısı ve boyutu dolayısıyla ağaç malzeme istenilen büyüklük sınırlarını aşamayabilir ve anatomik, genetik ya da yetiştirme bölgesi şartları olarak tanımlanan çevresel faktörlerin etkileri yüzünden çok değişken kalite özelliklerinde bulunabilir. Bu bağlamda ağaç malzemenin büyük boyutlu, eğmeçli ve kavisli elemanlarda bir bütün olarak kullanılması boyut kısıtı sebebi ve fire oranının artması sebebiyle ekonomik ve uygulama açısından mümkün değildir (Keskin ve Togay, 2003).

Büyük boyutlu taşıyıcı yapı elemanlarının üretiminde, tek parça ağaç malzeme kullanım imkanları sınırlı kalmaktadır. Çünkü ağaç malzemede bulunan budak, çatlak, spiral liflilik vb. kusurların tamamen giderilmesi mümkün olamamaktadır (Karaman ve Yıldırım, 2013). Bu bağlamda ağaç malzemede teknik açıdan uygulama zorluğu meydana getiren özelliklerin çözümü için laminasyon tekniği kullanılmaktadır. Laminasyon tekniği ile büyük boyutlu ağaç malzemelerden yüksek kalitede ve istenilen boyut ve formda lamine edilmiş ağaç

malzeme üretilmektedir. Laminasyon tekniği ağaç malzemenin kusurlarından arındırılarak kullanılmasına imkân sağlamakta ve üretilen malzemenin dayanım özellikleri masif ağaç malzemedenden daha yüksek olmaktadır (Keskin, 2001).

Günümüzde, tüm alanlarda olduğu gibi yapı elemanlarının üretiminde de hızlı değişim ve gelişimler söz konusudur. Daha çok ürün, daha uzun ömürlü ürün üretmenin yanı sıra, ekonomik, çevreye zarar vermeyen, zararlı atık bırakmayan, sürdürülebilir ürün üretimi; ayrıcalıklı bir üretim anlayışı olmanın ötesinde, doğal kaynakların verimli kullanılması bakımından bir mecburiyet haline gelmiştir. Ağaç malzeme yapı sektöründe giderek önem kazanmakta ve ağaç malzemedenden yapılan yapı elemanlarının sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Ağaç malzeme yalnızca yüksek bir ekolojik değer ve sürdürülebilirlik göstermekle kalmaz, aynı zamanda çeşitli amaçlar için çok çeşitli ahşap ürünler üretmeye olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında, ağaç malzeme heterojen özellik sergiler ve bu nedenle ağaç malzemeye bağlı mekanik özellikler önemli ölçüde değişkenlik gösterir. (Hofstetter, Hellmich ve Eberhardsteiner, 2007) Yapıştırılmış lamine ağaç malzeme (GLT) veya çapraz lamine edilmiş ağaç malzeme (CLT) gibi ahşap esaslı ürünlere ahşap levhaların birbirine yapıştırılmasıyla, ağaç malzemenin göstermiş olduğu mekanik davranışların homojenleştirilmesine ulaşılır ve kullanım yerinde istenmeyen özelliklerin etkisi büyük oranda azaltılır (Falk ve Colling, 1995).

Bu kapsamda, kolay elde edilebilir ve yenilenebilir rezerviyle ağaç malzeme önemli bir üretim hammaddesi özelliği taşımaktadır. Ancak, ağaç malzeme heterojen yapısı ve çevresel faktörler etkisi altında türlere ve anatomik özelliklerine göre farklı performans göstermesi, ağaç malzemeyi bazı uygulamalarda dezavantajlı konuma çekmektedir. Bunlardan biri de mekanik direnç özelliklerinin, birçok kullanım alanında yeterli olmasına karşın, geniş açıklıkların geçilmesi, sınırlı kesit ölçüleriyle yüksek dayanım göstermesi talepleri karşısında ağaç malzemenin yetersiz kalmasıdır. Bu yetersizliğin bertaraf edilmesinin istenildiği durumlarda, güçlendirme işlemi uygulanmaktadır (Yıldırım, Karaman, Tokdemir ve Erten, 2018). Güçlendirme; ağaç malzemenin maruz kaldığı yük etkilerine karşı direnç performansını arttırmak ve geçerli bir güvenlik düzeyine çıkarmak amacıyla yapısına farklı malzemeler uygulanması işlemidir (Laufenberg, Rowlands ve Krueger).

Ağaç malzemenin uzun büyüme döngüsü nedeniyle hammadde kaynağının sınırlı olduğu da bilinen bir gerçektir. Son yıllarda, çevre sorunlarına karşı dünya çapındaki uyarıya bir cevap

niteliğinde olan bambu, mevcut geleneksel malzemelere bir alternatif olmanın yanı sıra destek katmanı malzemesi olarak da ilgi görmektedir (Xiao ve Ma, 2012).

Son yıllarda yaşanan hızlı ekonomik ve sosyal ilerleme ile çevre dostu ve sürdürülebilir kalkınma tüm dünyada kabul görmüştür. Yeşil ve çevre dostu yapı malzemelerinin geliştirilmesi esastır. Çelik, beton ve duvar gibi geleneksel yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında, bambu ve ahşap hem yenilenebilir hem de düşük karbon emisyonlu biyolojik olarak parçalanabilir malzemelerdir. Bambu ve ahşap arasındaki yüksek mukavemet-ağırlık oranları ve mükemmel sismik performans gibi benzerlikler, araştırmacıları daha iyi mekanik performans elde etmek için iki malzemeyi birlikte kullanmanın mümkün olup olmadığını düşünmeye sevk etmektedir (Xu, Leng, Chen, Harries ve Chen, 2018).

Problem

Ağaç malzemenin verimli kullanılması ve kullanım yerinde maruz kaldığı mekanik etkilere karşı dayanım özelliklerinin bilinmesi gerekliliğinin yanı sıra ekonomik değer bakımından düşük maliyetli ağaç malzemenin yüksek maliyetli olanın yerine kullanılabilirliğinin de araştırılması gerekliliği bulunmaktadır. Diğer taraftan, teknolojik gelişmelerin ve her geçen gün ticari rekabetin küreselleştiği günümüzde, malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi, geliştirilen ürünün testlerinin yapılarak ikameleri ile mukayese edilmesi gerekmektedir.

Hipotez

Lamine ağaç malzeme üretiminde, lameller arasına, farklı özelliklerdeki malzemelerin destek katmanı olarak yerleştirilmesi durumunda, lamine ahşap elemanın mekanik özellikleri iyileştirilebilir.

Çalışmanın amacı

Bu çalışmanın temel amacı, farklı destek katmanları ile güçlendirilerek lamine edilmiş ağaç malzemenin dayanım özelliklerinin belirlenmesidir. Bu amaca ulaşmak için, lamine edilmiş ağaç malzemenin mekanik davranış özelliklerinin önemli göstergesi olan eğilme dayanımı, eğilmede elastikiyet modülü, basınç dayanımı, dinamik eğilme (şok) dayanımı ve

makaslama dayanımı belirlenerek malzeme özelliklerinin sayısal ifadeler ile tanımlanması gerekmektedir.

Bu kapsamda, çalışmanın alt amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Laminasyon tekniği ile masif malzemeye nazaran, boyutsal kararlılık kazandırmak,
- Ağaç malzemedeki doğal veya sonradan oluşan kusurlu kısımları, kapsam dışı bırakmak,
- İstenilen form ve geometride ahşap yapı elemanı üretebilmek,
- Masif malzemeye kıyasla daha yüksek dayanım özellikleri elde etmek.

Çalışmanın kapsam ve yöntemi

Çalışma kapsamında, 2 ağaç türü (sarıçam ve Doğu kayını), 3 farklı destek katmanı (bambu kaplama, çelik tel örgü ve karbon fiber kumaş), 2 tutkal çeşidi (PVAc-D₄ ve Pol-D₄), 2 farklı katman sayısı (3 ve 5 katmanlı) ve kontrol örnekleri (destek katmansız) için deney örnekleri hazırlanmıştır. Deney örneklerinin rutubet tayini TS EN 322, yoğunluk tayini TS EN 323, eğilme dayanımı TS EN 408+A1, eğilmede esneklik elastikiyet modülü TS EN 408+A1, basınç dayanımı TS EN 408+A1, dinamik eğilme (şok) dayanımı TS 2477 ve makaslama dayanımı ASTM D 3110 esaslarına uyularak, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Ağaççşleri Endüstri Mühendisliğı Bölümü test laboratuvarı ve Türk Standartları Enstitüsü Ahşap test laboratuvarında belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise deneylerden elde edilen ham veriler PC için yazılmış MSTAT-C paket programında 0,95 güven düzeyinde değerlendirilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Laminasyon

Geçmişten günümüze güzelliğiyle ve sağladığı pek çok faydasıyla hayatın önemli bir parçası olan ağaç malzemeyi gündelik yaşamın her alanında görmek mümkün olsa da üstün özelliklerine karşın, etkileri büyük oranda azaltılabilir olumsuz özellikleri de bulunmaktadır (Usta, 2015).

Organik, higroskopik, anizotrop ve heterojen bir yapıya sahip olan ağaç malzeme yanabilmekte, böcekler tarafından tahrip edilmekte, havanın nispi nemine bağlı olarak boyutları değişmekte, güneş ışınlarının etkisi ile bozunmaktadır. Günümüzde, ağaç malzemeye olan talebin artması ve orman kaynaklarının giderek azalması nedeniyle ağaç malzemenin kullanım yerindeki ömrünün artırılması daha da önemli bir hal almıştır (Özen ve Sönmez, 1996).

Ağaç malzemenin servis ömrünün arttırılması için emprenye, odun modifikasyonu ve ağaç malzemenin laminasyonu gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile ağaç malzemenin olumsuz özellikleri en aza indirgenmekte ve olumlu özellikleri daha da iyileştirilebilmektedir (Demirel ve Temiz, 2015).

Lamine edilmiş ağaç malzeme, iki ya da daha fazla katın tutkallanarak ve katların lif yönleri birbirine paralel ya da dik gelecek şekilde birleştirilmesi ile elde edilir. Laminasyon tekniğinde farklı ağaç türü, değişken kat sayısı, farklı boyut, şekil ve kat kalınlıkları uygulanabilmektedir (Perçin, Özbay ve Ordu, 2009).

Ağaç işleri endüstrisinde her geçen gün daha yaygın kullanım alanı bulan lamine ağaç malzeme, TS EN 386'ya göre; ahşap kaplamaların lifleri birbirine paralel olarak yapıştırılmasıyla elde edilen yapı elemanı olarak tanımlanmaktadır. Lamine elemanı oluşturan katlar arasındaki rutubet farkı %4'ü geçmemelidir. Aksi halde, farklı çalışma şartları sonucu oluşan gerilmeler liflere dik yöndeki çekme direncini aşarak çatlamalara

sebeep olabilir. Ayrıca, laminasyon işleminin yapıldığı ortamın bağıl neminin %40-70 arasında, sıcaklığının ise en az 15°C olmalıdır (Keskin ve Togay, 2003).

Lamine edilmiş ağaç malzeme temel prensipte ağaç malzemelerden birden fazla olmak üzere belli bir kalınlık ve kat sayısında elde edilen lamellerin aralarına yapıştırıcı uygulanarak; yapıştırıcı ve lameller arasındaki kürlenme aşamasında basınç desteği süreçlerini kapsamaktadır (Echavarria, Jimenez ve Ochoa, 2012).

2.1.1. Laminasyonun avantajları

1. Masif ağaç malzemeden elde edilecek ahşap yapı elemanlarını boyut kısıtına sahipken laminasyon teknolojisi ile boyut kısıtı olmadan ahşap yapı elemanları üretmek mümkündür.
2. Mimari, iç mimari, mobilya ve dekorasyon çalışma alanlarında istenilen stilde, tarzda ve boyutta, sınırsız form ve şekillerde çalışma imkânı sunmaktadır (Resim 2.1).



Resim 2.1. Tall Tree Sağlık Merkezi, Victoria (Structurlam, 2015)

3. Yapı elemanlarının tasarımında, yük durumuna bağlı olarak enine kesit alanında uygulama yerine göre değişiklik yapmak mümkündür. En ve boy birleştirme

uygulamalarında yüklerin uygulanması ile boyut kısıtına sahip ağaç malzemelerin kullanımına imkan sağladığından fire oranı en aza inmektedir.

4. Masif ağaç malzeme, bünyesinde barındırdığı kusurlarından (budak, çatlak, lif kıvrıklığı, çürüklük, reaksiyon odunu, ardaklanma vb.) tamamen arındırılarak değerlendirilebilir.
5. Lamine edilmiş ağaç malzeme üzerinde çeşitli kat sayılarında farklı kalınlıklarda ve renklerde uygulama ile ağaç malzemenin imkân sağladığından daha fazla çeşitlikte estetik oluşum elde edilebilir.
6. Ağaç malzemenin daha rasyonel ve işlevsel olarak kullanılmasına olanak sağlar.
7. Lamine edilmiş ağaç malzeme, aynı tür masif ağaç malzemeye kıyasla daha az çalışmaktadır. Bu durumun sebebi ise laminasyon uygulamasında lamellerin katları arasında kullanılan yapıştırıcının su itici özelliği gösterilebilir. Yapıştırıcı kullanımının bir diğer önemli avantajı, ahşap yapı elemanlarının daha az gerilimli laminasyon uygulamalarında istenilen boyutta düşük kalite dereceli ağaç malzemenin kullanılabilmesidir.
8. Lamine edilmiş ağaç malzeme, geniş ve açıklıklı yapılarda geometrik strüktür uygulamalarına imkân sağlamaktadır.
9. Üretim sürecinde masif ağaç malzemeyi kıvrarak, diğer malzemelerle imkânsız veya çok zor olan çeşitli mimari efektler lamine edilmiş ağaç malzemeler ile elde edilebilmektedir (Resim 2.2 ve Resim 2.3).
10. Lamine edilmiş ağaç malzemedan, yapısal elemanlar, mukavemet ve rijitlik gerekliliklerine göre belirlenen uzunluklar boyunca değişen kesitlerde tasarlanabilir. Benzer şekilde, kemerler genellikle tasarım gerekliliklerine göre değişen kesitlere sahiptir.
11. Lamine edilmiş ağaç malzeme, masif ağaç malzeme ile aynı özelliği sergilemektedir. Bununla birlikte lamine edilmiş ağaç malzeme daha az değişkenliğe, daha iyi mekanik özelliklere sahiptir ve ağaç malzemedan bulunan budaklar, sallanmalar, damarların eğimi vb. gibi doğal kusurların daha iyi kontrol edilmesini ve giderilmesini sağlar.
12. Lamine edilmiş ağaç malzeme, güçlendirme amacıyla yüzeysel olarak veya lameller arasına yerleştirme yöntemi ile pek çok farklı malzeme destek katmanı olarak kullanımına olanak sağlamaktadır.
13. Lamine edilmiş ağaç malzemedan; kolon, kiriş, kemer, ve köprü gibi ahşap yapı elemanları üretilebilmekte, birleşmeleri için gerekli tüm detaylar ve metal aksesuarlar

uygulamada tamamlanabilmektedir (Karayılmazlar, abuk, Atmaca ve Aşkin, 2007; Stark ve Cai, 2021).



Resim 2.2. Ulusal Tayvan Üniversitesi tarafından yapılan GLULAM köprü (Techlam, 2017)



Resim 2.3. Cambridge Üniversitesi, Eğitim Fakültesi (Vile, 2022)

2.2. Güçlendirme

Ağaç malzemenin ya da odun esaslı kompozit malzemelerin, güçlendirilmesi günümüz için yeni bir fikir değildir. Laufenberg ve arkadaşlarına (Laufenberg, Rowlands ve Krueger, 1984) göre 1960'lı yıllardan bu yana güçlendirme uygulamaları yapılmaktadır. Sentetik lifler kullanılarak ağaç malzemenin güçlendirilmesi ilk olarak Wangaard (Wangaard, 1964) ve Biblis (Biblis, 1965) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Güçlendirme; ağaç malzemenin maruz kaldığı yük etkilerine karşı dayanım performansını arttırmak ve azami güvenlik düzeyine çıkarmak amacıyla yapısına veya birleştirme suretiyle farklı malzemeler uygulanması işlemidir. Düşük mekanik özelliklere sahip olan masif ağaç malzeme ya da odun esaslı kompozit malzemeler, güçlendirme işlemine tabii tutulabilmektedir (Bal ve Özyurt, 2015).

Ağaç malzeme anatomisi gereği değişken özellikler gösteren bir yapı sergilemektedir. Bu değişkenliği azaltmak için farklı yöntem ve işlemler uygulansa da son yıllarda ağaç malzemenin güçlendirilmesi üzerine çalışmalara yoğunlaşılmıştır. Bu bağlamda karbon ve cam elyafların (FRP'ler) ağaç malzemeye veya GLULAM kirişlere destek katmanı güçlendirmesi ile geniş çapta araştırmalar yapılmıştır (Resim 2.4). Karbon ve cam elyafları oluşturan lifler sert ve güçlüdür, düşük yoğunluğa sahip ve korozyona dayanıklıdır. Bükülme özelliklerini, kesme özelliklerini veya her ikisini artırmanın mümkün olduğu yapılan çalışmalarca tespit edilmiştir (Çiğdem, 2018; Mıstak, 2013; Uzel, 2015).



Resim 2.4. FRP ile güçlendirme uygulaması örneği (Composites Portal, 2022)

Öte yandan, FRP bileşenleri olarak kullanılan liflerin geri dönüştürülmesi oldukça zordur. Bu açıdan yeni çözüm arayışlarına girilmiş ve güçlendirme olarak bazı doğal lifler içeren malzemelerin (bambu, pamuk, yün vb.) özellikleri araştırılmış ve rapor edilen sonuçlar, bazılarının birçok uygulamada FRP'lere alternatif olarak umut verici bir şekilde kullanıma uygun olduğu tespit edilmiştir. Doğal lifler hafiftir, yenilenebilir ve yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikleri onları ahşap yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılmaya uygun hale getirmiştir (Echavarria, Jimenez, ve Ochoa, 2012).



3. LİTERATÜR ÖZETİ

Ağaç malzemenin verimli bir şekilde kullanılabilmesi, kusurlarından arındırılması, değişik formlarda üretim yapılabilmesi, kısa boy ve dar enli ağaç malzemelerden daha büyük boyutlu ağaç malzeme üretilebilmesi ve eğri formu imalatlarda liflerin diyagonal kesiminden dolayı dayanım özelliklerinin azalmaması için laminasyon yönteminin uygulanması zorunluluk teşkil etmektedir (Ulupınar, 1998).

Sağlam parçalardan elde edilen lamine ağaç malzeme, kusursuz olması yanında lamine katlarda farklı kalınlık ve renkte ağaç malzemelerden oluşturulduğu için estetik değeri de yüksektir (Örs ve Keskin, 2008).

Lamine edilmiş ağaç malzemenin bükülme esnasındaki gerilme hatası kırılğan, rastgele ve tahmin edilmesinin zor olduğu, yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini artırmak için, lamellar arasında veya yan yüzeylerinde yüzeysel kaplama (destek katmanı) olarak fiberglas veya bambu kullanılabileceği, sert ve güçlü malzemelerle güçlendirerek ahşap yapı elemanlarının kesitlerinin azaltılabileceği, farklı destek katmanları ile lamine edilmiş ağaç malzemenin, orman kaynakları yetersiz kalması durumunda, yüksek kaliteli masif ahşap kirişlerin yerine iyi bir seçenek olabileceği bildirilmiştir (Echavarria, Jimenez ve Ochoa, 2012).

Laminasyon işleminde kullanılacak olan odunun yapısı, yüzey pürüzlülüğü, pres basıncı, presleme süresi ve kullanılacak olan tutkalın teknik özellikleri odunun yapışma dayanımı üzerinde etkili olmaktadır. Farklı ağaç türlerinin aynı anda preslenmesi halinde pres basıncı yumuşak oduna göre belirlenir. Pres basıncı, yumuşak ağaçlarda $0,6-1 \text{ N/mm}^2$, sert ağaçlarda ise $0,2-1,6 \text{ N/mm}^2$ arasında olması gerektiği belirtilmiştir (Dilik, 1997).

Lamine ağaç malzemeyi oluşturan lamellar arasındaki rutubet farkı TS EN 386 ve DIN 68140'a göre %4'ü aşmamalıdır. Aksi durumda farklı çalışma şartları sonucu meydana gelen gerilmeler liflere dik yöndeki çekme dayanımını aşarak ağaç malzemede çatlamalara sebep olabilmektedir (Keskin, 2001).

Farklı ağaç türü, tutkal çeşidi, katman kalınlığı ve katman sayısı esasına göre üretilen lamine edilmiş ağaç malzemenin mekanik özelliklerini inceleyen çok sayıda araştırma yapılmıştır.

Çam, göknar, kayın, meşe ve akçaağaç odunlarının PVAc ve epoksi tutkalı ile yapıştırılması ile elde edilen ağaç malzemede tutkal çeşidinin yapışma direncine etkisinin, lifler yönünde çekme, basınç ve yarıma dayanımında önemli olduğu (Demetçi, 1991), 2 ve 4 mm kalınlığındaki Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) kaplamalardan poliüretan tutkalı ile lamine edilen ağaç malzemelerin dayanım özelliklerinin, PVAc tutkalı ile lamine edilen ağaç malzemelerden daha yüksek olduğu (Şenay, 1996), okaliptus (*Eucalyptus camaldulensis*) kerestesinden üre-formaldehit tutkalı ile üretilen lamine ağaç malzemelerin teknolojik özellikleri, PVAc tutkalı ile üretilenlere göre daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Eren, 1998).

PVAc, Desmodur-VTKA ve Klebit 303 tutkalları ile yapıştırılarak 3, 5 ve 7 katmanlı olarak Sarıçam, Doğu kayını ve meşe kerestelerinden üretilen lamine edilmiş ağaç malzemelere eğilme dayanımı deneyi uygulanmış, en yüksek eğilme dayanımı ise PVAc tutkalı ile üretilen 5 katmanlı Doğu kayınından elde edildiği (Döngel, 1999), Doğu kayını, Sarıçam, Toros sediri ve Sapsız meşeden elde edilen masif ağaç malzeme ile lamine edilmiş ağaç malzemelerin ısı genleşme katsayılarının hesaplanması üzerine yapılan çalışmada genişlik, kalınlık ve boyuna yönlerde lamine ağaç malzemelerde ısı genleşme katsayısı masif ağaç malzemelerden daha düşük olduğu bildirilmiştir (Keskin, 2001).

Benzer bir çalışmada ise polivinilasetat (PVAc), poliüretan (PUR1), çift bileşenli poliüretan (PUR2) ve üre-formaldehit tutkalları kullanılarak lamine edilmiş Sarıçam malzemenin mekanik özellikleri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre en düşük değeri üre-formaldehit tutkalı, en yüksek değerleri ise PUR1 tutkalı göstermiş, PVAc ve PUR2 tutkalları da PUR1 tutkalına çok yakın değerler verdiği (Öztürk ve Arıoğlu, 2006), 3 mm kalınlığında kayın ve kavak kesme kaplamalarından 10 farklı kombinasyonda, polivinilasetat (PVAc-kleiberit 303) tutkalı ile elde edilmiş lamine edilmiş ağaç malzemelerin eğilme dayanımı ve elastikiyet modülü değerleri aynı türün masif olanına oranla daha yüksek değerde olduğu ve kayının laminasyona katılım oranı arttıkça uygulanan deneylerin tümünde yüksek sonuçlar verdiği ve dayanım özelliklerini daha yüksek bir hale getirdiği bildirilmiştir (Burdurlu, Kılıç, İlçe ve Uzunkavak, 2007).

Kavisli lamine edilmiş ahşap yapı elemanlarda, ağaç türü, tutkal çeşidi, katman kalınlığı, ağaç türü ve lamel kalınlığına göre katman simetrisi, yapısal form ve eğim (kavis) yarıçapı gibi değişkenlerin dayanım özellikleri ve sehim miktarı üzerinde doğrudan etkili olduğu tespit edilmiştir (Altınok, Burdurlu ve Özkaya, 2008).

Farklı tutkallarla lamine edilmiş ağaç malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda lamine ağaç malzemelerin mekanik özelliklerinin masif malzemelerden daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Yapılarda daha fazla yük taşıması nedeniyle lamine ağaç malzemelerin masif malzemelere göre ilgili kullanım yerlerinde daha tercih edilebilir olduğu belirtilmiştir (Perçin, Özbay ve Ordu, 2009).

Doğu kayını, sarıçam ve kavak odunlarından 11 katmandan oluşan, PVAc tutkalı kullanılarak lamine edilmiş deney örnekleri üretilerek eğilme dayanımı ve eğilmede elastikiyet modülü belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, Sarıçam ve kavağın laminasyon işlemi sonrası eğilme dayanımı ve elastikiyet modülünde artış belirlenmiş olsa da lamine ağaç malzemelerin, masif malzemelerin eğilme dayanımı ve elastikiyet modülüne yakın değerler sağladığı tespit edilmiştir (Kasal, Efe ve Dizel, 2010).

Yapılan literatür taramalarında laminasyon tekniği ile kompozit malzeme üretimi alanında birçok çalışma yapıldığı belirlenmiştir. Düşük mekanik özelliklere sahip olan masif ağaç malzeme ya da odun esaslı kompozit malzemeler, değişik bazı yöntemlerle güçlendirilebilmektedir. Yapılan çalışmalar dikkate alındığında güçlendirme için çoğunlukla sentetik lifler içeren malzemeler kullanılmaktadır (Bal ve Özyurt, 2015). Güçlendirme çalışmaları ilk olarak cam elyaf güçlendirmesi ile Wangard (1964) ve Biblis (1965) tarafından yapılmıştır. Her iki araştırmacı da bu ilk denemelerde farklı türdeki masif ağaç malzemeye epoksi reçine ile işlem görmüş tek yönlü cam elyaf kullanarak denemeler yapmışlardır. Lamine edilmiş kirişler üzerinde ilk deneme ise Theakston (1965) tarafından yapılmıştır. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalarda ağaç malzemenin, ağaç malzeme dışında farklı tür malzemelerle laminasyon işlemine tabii tutulduğu ve bu sayede farklı kompozit ürünler elde edildiği görülmüştür.

Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) keresteden hazırlanmış papel kaplamaları 9 katmanlı olarak lameller arasına destek katmanları (sıva altı filesi, fiber tel file, alüminyum tel file) yerleştirilip PVAc-D₃ tutkalı ile yapıştırılarak elde edilen ahşap lamine elemanların bazı fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi (Şeker, 2011), cam ve karbon elyafı ile güçlendirilmiş lamine Sarıçam malzemenin bazı teknolojik özelliklerinin belirlenmesi (Güler ve Subaşı, 2012), cam elyaf kumaşı ile güçlendirilmiş ahşap yapı elemanların bazı fiziksel özelliklerin belirlenmesi (Bal ve Özyurt, 2015), GFRP'nin kavak (*Populus deltoids*)

ve kayın (*Fagus orientalis* L.) kullanılarak üretilmiş lamine ağaç (glulam) malzemenin eğilme dayanımına etkisi (Osmannezhad, Faezipour, ve Ebrahimi, 2014), Kızılçamdan üretilen, çelik plaka ve cam lifi ile güçlendirilmiş tabakalı kerestelerin eğilmedeki dayanım özelliklerinin belirlenmesi (Güntekin ve Aydın, 2015), destek katmanı ve lamel kalınlığının lamine ahşap yapı elemanlarının mekanik özelliklerine etkisi (Uzel, 2015), GFRP ile desteklenmiş ahşap sandviç kirişlerin statik yük altındaki bükülme performansı (Qi, Fang, Shi, Liu, ve Bai, 2017), cam elyaf kumaş destekli (GFRP) lamine edilmiş kestane malzemenin eğilme dayanımı (Karaman ve Yıldırım, 2018), ıhlamur lamine edilmiş malzemenin eğilme dayanımına cam elyaf kumaş tipinin etkisi (Karaman ve Yıldırım, 2019), GFRP ile güçlendirilmiş lamine şerit (LSL); mekanik ve fiziksel özelliklerin belirlenmesi (Moradpour, Pirayesh, Gerami, ve Jouybari, 2018), cam elyaf kumaşı ile desteklenmiş kavak lamine ağaç malzemenin bazı mekanik özelliklerin belirlenmesi (Yıldırım, Karaman, Tokdemir ve Ertekin, 2018) ile ilgili yapılan çalışmalar mevcuttur.

Fiberglas kumaşlar ve bambu ile güçlendirilmiş glulam kirişlerin mekanik performansını belirlemek için yapılan bir çalışmada; Glulam kiriş, cam elyafı veya bambu ile gerilimde ve kenar yüzeyleri boyunca güçlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, cam elyafı ve bambu destek katmanlı üretilenler daha yüksek glulam kiriş performansı sağlamıştır. Sonuçlar, destek katmanlı örneklerin destek katmansız örneklere göre oldukça yüksek bir rijitlik sağladığını göstermiştir (Echavarria, Jimenez ve Ochoa, 2012).

Laminasyon uygulamasından önce, işlemden kullanılacak ağaç malzemenin kusurlarından arındırılması, lamellerin dayanımının artmasını sağlamıştır. Laminasyon işleminde kullanılan yapıştırıcıların, ağaç malzemenin bünyesindeki hücre boşluklarını doldurarak gevrek yapıya ulaşmasını sağladığı ve her bir katman arasında oluşturduğu tabakanın liflere paralel basınç dayanımı üzerinde yüksek dayanım etkisi yarattığı belirlenmiştir. Aynı zamanda, mekanik özelliklerin güçlendirilmesi amacıyla katmanlar arasına yerleştirilen destek katmanları liflere paralel basınç dayanımını artırıcı özellik göstermiştir (Uzel, Togay, Anıl ve Söğütü, 2018).

Cam elyaf kumaş malzemenin güçlendirme amaçlı kullanıldığı bir çalışmada, tutkal çeşidi bakımından en yüksek eğilmede elastikiyet modülü değeri poliüretan (PU-D₄) tutkalından, en düşük eğilmede elastikiyet modülü değeri ise polivinilasetat (PVAc-D₃) tutkalından elde edilmiştir. Cam elyaf kumaş tipi bakımından en yüksek eğilmede elastikiyet modülü değeri

cam elyaf kumaş (200 gr/m² sık dokuma) destek katmanından, en düşük eğilme elastikiyet değeri ise kontrol deney örneklerinden elde edilmiştir. Eğilmede elastikiyet modülü değerlerine göre cam elyaf kumaş ile destek katmanlı örneklerin destek katmansız örneklere göre esnekliği daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Öte yandan cam elyaf kumaşların lamine edilmiş ağaç malzemede; yapılarına bağlı olarak elastiklik özelliğini artırdıkları bildirilmiştir (Karaman ve Yıldırım, 2019).

Lamine edilmiş bambu kerestenin (LBL) mekanik özellikleri araştırılan bir çalışmada, LBL'nin (Laminated Bamboo Lumber) çekme gerilimi-gerinim ilişkisi, yüklemekten kırılmaya kadar doğrusal bir elastik tepki sergilemiştir ve kırılmadan önce görünür bir plastik deformasyon meydana gelmemiştir. Bununla birlikte, çekme dayanımı, basınç dayanımının iki katı kadar tespit edilmiştir. Ayrıca, teorik sonuçların, oldukça güvenilir ve geçerli olduğu kanıtlanan test sonuçlarıyla yüksek oranda örtüştüğü görülmüştür (Chen, Yu, Li ve He, 2020).

LBL ile yapılacak gelecekteki araştırmalar için referans görevi görececek bir çalışmada, LBL'nin öne çıkan dayanım özelliklerine ek olarak, yapısal elemanların çeşitli geometrik kesitlerde ve şekilde oluşturulabildiği, farklı yükseklik ve yapı açıklıklarını karşılayabilir olduğu, düşük maliyetli ve sürdürülebilir üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve sonuç olarak talepteki artış sebebiyle yapısal LBL'nin kamu ve konut binalarının yapımında uygun bir seçenek olduğu, LBL fiziksel ve mekanik özellik araştırmalarının ilerlemesiyle maliyet ve çevresel uyumluluk açısından karlı olan en yenilikçi çözümlerin yaratılmasına yardımcı olacağı vurgulanmıştır (Dauletbek, Li, Xiong, ve Lorenzo, 2021).

Isıl işlem uygulanmış ve fenol formaldehit (FF) tutkalı kullanılarak karbon ve cam elyaf ile güçlendirilmiş kayın (*Fagus orientalis* L.) ağacından elde edilen lamine kompozit örneklerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılan bir çalışmada, ahşap malzemelere 150, 175 ve 200 °C sıcaklıklarda 3 saat süre ile ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Test sonuçları, karbon ve cam elyaf ile güçlendirmenin eğilme dayanımını ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerini artırdığı tespit edilmiştir. Genel olarak, karbon fiber ile güçlendirilmiş deney örneklerin eğilme ve basınç dayanımı değerleri, cam elyaf ile güçlendirilmiş örneklerden daha yüksek, liflere paralel basınç direnci ve liflere paralel yapışma direnci değerleri ise daha düşük belirlenmiştir (Çiğdem ve Perçin, 2023).



4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Malzeme

4.1.1. Ağaç malzeme

Deney örneklerinin hazırlanmasında, Türkiye’de doğal olarak yetişen ve ağaçları sektöründe yaygın olarak kullanılan Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) ve sarıçam (*Pinus silvestris* L.) olmak üzere iki farklı ağaç türü kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan ağaç malzemeler, Ankara Mobilyacılar Sitesinden rastgele seçim yöntemi ile temin edilmiştir. Ağaç malzemenin budaksız, ardaksız, büyüme kusurları bulunmayan, düzgün lifli ve diri odun kısmı olmasına özen gösterilmiştir.

4.1.2. Tutkal

Çalışmada, açık ve kapalı ortamlarda yüksek dayanım gösteren D4 yapışma kalitesine sahip, %5 sertleştirici (Turbo hardener 303.5) ilavesiyle güçlendirilmiş çift bileşenli polivinilasetat (PVAc–D4) ve poliüretan (Pol–D4) tutkal kullanılmıştır.

Polivinilasetat (PVAc-D₄)

BS EN 204 standardına göre tek bileşenli olarak D3 hizmet sınıfı için kullanıma hazır halde pazarlanmaktadır. Kullanım esnasında, tutkal çözeltisine %5 oranında sertleştirici (turbo hardener) katılımı ile rutubete dayanıklılığı daha da artırılarak, BS EN 204’e göre D4 yapışma kalitesine sahip hale getirilebilmektedir (Keskin, 2001).

PVAc–D₄ tutkalın üretici firma tarafından belirtilen teknik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. PVAc–D₄ tutkalın teknik özellikleri (Kleiberit, 2022; Söğütlü, 2004)

Tipi	PVAc dispersiyon	
Sertleştirici Oranı	D ₃ : Tek bileşenli (Bileşen A) D ₄ : %5 Turbo Hardener (Bileşen B) ilaveli	
Yoğunluk	Bileşen A = 1,10 g/cm ³ Bileşen B = 1,13 g/cm ³	
Viskozite (20 °C)	13,000±2,000 mPas	
Renk (Tek ya da Çift Bileşen)	Beyaz	
Tutkal Çizgisi	D ₃ : Esnek, şeffaf D ₄ : Sert, hafif sarı	
Uygulama Miktarı	120-200 g/m ²	
Açık Zaman	6-10 dakika	
Pres Basıncı	0,1-1 N/mm ²	
Presleme Süresi (Masif parça yapıştırma)	20 °C’de 15 dakika 50 °C’de 5 dakika 80 °C’de 2 dakika	Çift bileşenli olarak kullanıldığında presleme süresi %50 artar.
Tam Sertleşme Süresi	7 gün	
Uygulama alanı	Pencere ve kapı imalatı, yüzey yapıştırma en ve boy birleştirmelerin yapıştırılması, yüksek frekans (20,000 kHz) yapıştırma vb.	

Poliüretan (Pol-D₄)

BS EN 204 standardına göre tek bileşenli olarak D₄ hizmet sınıfı için kullanıma hazır halde pazarlanmaktadır. Pol–D₄ tutkalın üretici firma tarafından belirtilen teknik özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Pol–D₄ tutkalın teknik özellikleri (Kleiberit, 2022; Söğütlü, 2004)

Tipi	Poliüretan
Yoğunluk	1,13 g/cm ³
Viskozite (20 °C)	8,000±1,000 mPas
Renk	Sarımsı kahverengi
Uygulama Miktarı	100-200 g/m ²
Açık Zaman	20-25 dakika
Pres Basıncı (En az)	0,6 N/mm ²
Presleme Süresi (Masif parça yapıştırma)	20 °C’de 60 dakika 40 °C’de 30 dakika 60 °C’de 10 dakika
Tam Sertleşme Süresi	34 saat
Uygulama alanı	Pencere ve kapı imalatı, lamine yapıştırma, dış mekan kullanımındaki eklem yapıştırma, seramik ve çimentolu malzemelerin yapıştırılması vb.

4.1.3. Destek katmanı

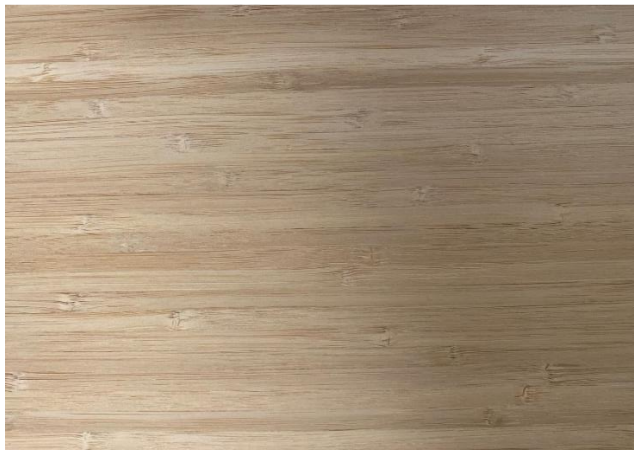
Lamine ağaç malzemenin dayanım özelliklerini iyileştirmek amacıyla, destek katmanı malzemesi olarak; Yapı endüstrisinde güçlendirme malzemesi olarak kullanılan sentetik lif içeren karbon fiber kumaş, uzun lifli olması özelliği ile özellikle eğilme dayanımının yüksek olduğu bilinen bambu kaplama ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen çelik tel örgü kullanılmıştır.

Destek katmanı olarak kullanılan malzemeler Ankara OSTİM ve Ankara Mobilyacılar Sitesinde faaliyet gösteren işletmelerden temin edilmiştir.

Bambu kaplama

Lamine edilmiş ağaç malzemelerin dayanım özelliklerini arttırmak amacıyla katmanlar arasına 0,6 mm kalınlığında doğal bambu kaplama, destek katmanı olarak kullanılmıştır (Resim 4.1).

Bambu, yapısal ahşap ürünlere benzer mekanik özelliklere sahip olması ve hızlı büyümesi ile yapı endüstrisinde yoğun ve sürdürülebilir kullanımı sayesinde, son zamanlarda büyük ilgi görmüştür. Ayrıntılı bir nicel yaşam döngüsü analizinden sonra, Van der Lugt ve ark. bambunun yapısal kullanımının çevre üzerinde çelik veya beton gibi diğer yapı malzemelerine göre daha az olumsuz etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir (Van der Lugt P, 2005).



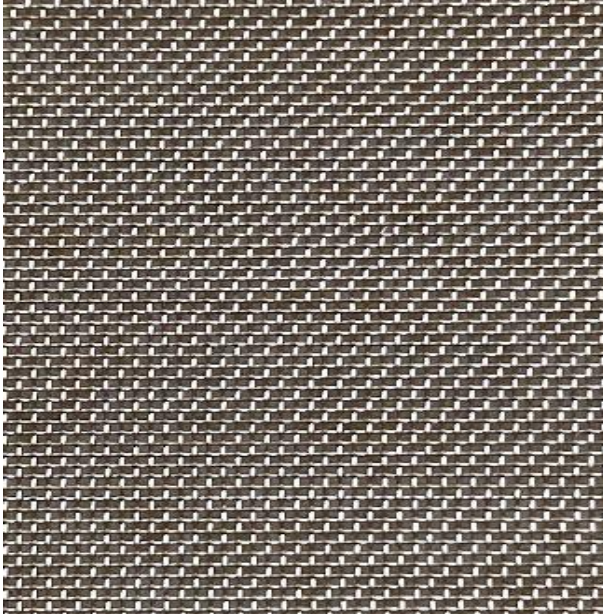
Resim 4.1. Bambu kaplama

Son yıllarda bambu temelli ürünlerin üretim teknolojileri ivme kazanarak çeşitli yapı malzemeleri ile birleşimi, laminasyonu ve karışımları uygulanmaktadır (Dlamini, Fakudze, Makombe, Muse ve Zhu, 2022).

Çelik tel örgü

Paslanmaz çelik tel örgü, mekanik özelliklerindeki süreklilik, yüksek ısılarda bile deforme olmamaları nedeniyle çeşitli yerlerde örülmüş olarak kullanılırlar. Uzun ömürlü olması, bakım istememesi ve mekanik dirençlerinin yüksek olması nedeniyle tercih edilirler (Krom Tel, 2022).

Bu çalışmada, destek katmanı olarak 0,20 mm kalınlığında, gözenek çapı 0.12 mm, gözenek aralığı 242 μm (70 mesh) ve 304 kalite paslanmaz çelik tel örgü kullanılmıştır (Resim 4.2).

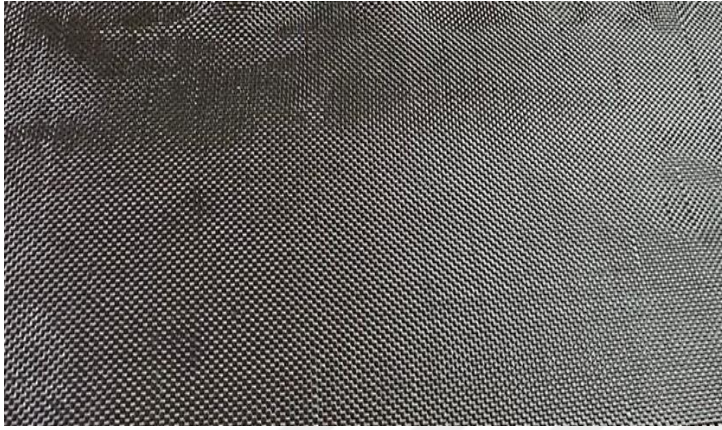


Resim 4.2. Çelik tel örgü

Karbon fiber kumaş

Karbon fiber takviyeli olarak polimer (CFRP) kompozit, havacılık ve uzay endüstrisinde, otomobil imalatında, spor malzemeleri ve pek çok mühendislik disiplinde yaygın olarak kullanılmaktadır. CFRP yapı mühendisliği uygulamalarında 30 yılı aşkın bir süredir kendini

kanıtlamıştır ve ayrıca çatı yapıları, güverte ızgaraları ve çoğu dış kaynaklı güçlendirme sisteminde tercih sebebi olmuştur. CFRP kompozitleri, karbon fiber ve matris olmak üzere iki kısımdan oluşur. Karbon fiber gücü sağlar, matris genellikle karbon fiber destek katmanını birbirine bağlayan bir polimer reçinedir. Çelik veya alüminyumdan farklı olarak, CFRP kompozit, çok yönlü dayanım özelliklerine sahip anizotropik bir malzemedir (Sun, Luo ve Sun, 2018).

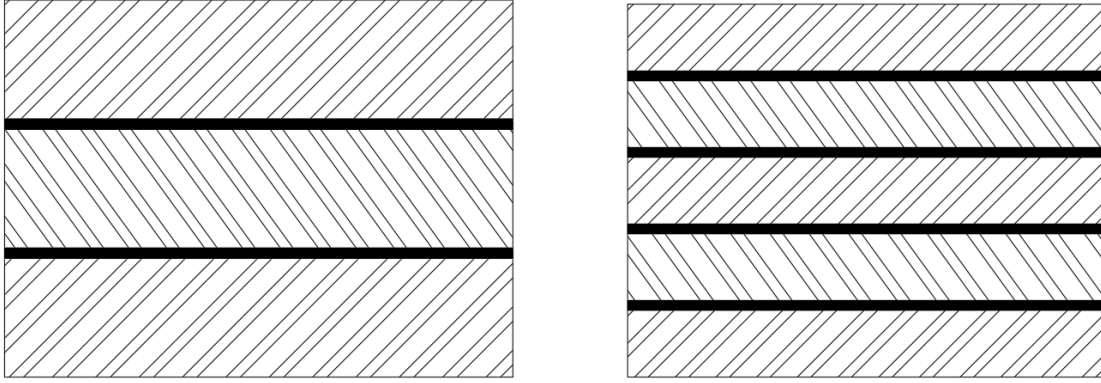


Resim 4.3. Karbon fiber kumaş

Bu çalışmada, lamine edilmiş ağaç malzemeyi güçlendirme katmanı olarak lameller arasına sentetik lifler içeren 200 gr/m² plain dokuma, reçine tüketimi 234 gr/m², laminat kalınlığı 0,327 mm, laminat ağırlığı 38 gr/m² olan karbon fiber kumaş (CFRP) destek katmanı olarak uygulanmıştır (Resim 4.3).

4.2. Yöntem

Lamine ahşap elemanlar, TS EN 408 + A1 (TSE, 2014) “Ahşap Yapılar – Yapı Kerestesi ve Tutkallanmış Lamine Kereste – Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Tayini” standardına göre hazırlanmıştır. Hava kurusu haldeki katman sayısına göre uygun kalınlıktaki masif lameller, aralarına destek katmanları (karbon fiber, bambu ve çelik tel örgü) yerleştirilerek ve destek katmanı olmayan kontrol örnekleri; 3 ve 5 katmanlı olarak lamel yüzeylerine 120-170 g/m² hesabıyla tutkal sürülerek mekanik pres makinesinde 0,7-1,0 N/mm² basınç uygulayarak soğuk olarak preslenmiştir (Şekil 4.1 ve Resim 4.4). Presleme işleminden sonra levhalar, 1 hafta süreyle havalandırılabilen ve doğrudan güneş ışığına maruz kalmayan ortamda istif halinde bekletilmiştir.



Şekil 4.1. Destek elemanlı 3 ve 5 katmanlı uygulama örneği



Resim 4.4. Sarıçam, poliüretan tutkal, karbon fiber kumaş kombinasyonu

Bir deneyde kullanılmak üzere, 2 ağaç türü (sarıçam ve Doğu kayını), 2 tutkal çeşidi (Pol-D₄ ve PVAc-D₄), 3 destek katmanı (karbon fiber kumaş, çelik tel örgü ve bambu kaplama), 2 farklı katman sayısı (3 ve 5 katmanlı) için 10'ar adet ve her deney gurubu için 80 adet kontrol örneği olmak kaydıyla 320 adet ((2x2x3x2x10=240)+80=320)) deney örneği hazırlanmıştır. Bu durumda; eğilme dayanımı, basınç dayanımı, dinamik eğilme (şok) dayanımı ve makaslama dayanımı olmak üzere 4 ayrı deney için 1280 adet (4x320=1280) deney örneği hazırlanmıştır. Eğilmede elastikiyet modülünün tayinini belirlemek için eğilme dayanımı deneyleri yapılırken test cihazına eklenen ekstansometre ile ölçülen sehim miktarları üzerinden hesaplama yapılmıştır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Bir deney için kullanılan deneme deseni

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi	Katman Sayısı	Destek Katmanı	Yineleme
Sarıçam	Pol-D4	3	Bambu kaplama	10
			Karbon fiber kumaş	10
			Çelik tel örgü	10
			Destek katmansız (Kontrol)	10
		5	Bambu kaplama	10
			Karbon fiber kumaş	10
			Çelik tel	10
			Destek katmansız (Kontrol)	10
	PVAc-D4	3	Bambu kaplama	10
			Karbon fiber kumaş	10
			Çelik tel	10
			Destek katmansız (Kontrol)	10
		5	Bambu kaplama	10
			Karbon fiber kumaş	10
			Çelik tel	10
			Destek katmansız (Kontrol)	10
Doğu kayını	Pol-D4	3	Bambu kaplama	10
			Karbon fiber kumaş	10
			Çelik tel	10
			Destek katmansız (Kontrol)	10
		5	Bambu kaplama	10
			Karbon fiber kumaş	10
			Çelik tel	10
			Destek katmansız (Kontrol)	10
	PVAc-D4	3	Bambu kaplama	10
			Karbon fiber kumaş	10
			Çelik tel	10
			Destek katmansız (Kontrol)	10
		5	Bambu kaplama	10
			Karbon fiber kumaş	10
			Çelik tel	10
			Destek katmansız (Kontrol)	10
Bir deney için hazırlanan deney örneği				320 Adet

4.2.1. Deney örneklerinin hazırlanması

Deney örneklerinin kondisyonlanması

Çalışma kapsamındaki her bir deney için esas alınan standartların öngördüğü ölçü ve formlarda kesilerek/biçimlendirilerek hazırlanan deney örnekleri, deneylerden önce $20 \pm 2^\circ\text{C}$

sıcaklık ve % 65 ± 5 bağıl nem koşullarındaki iklimlendirme dolabında denge rutubetine (%12) ulaşmaya kadar bekletilmiştir (Resim 4.5).



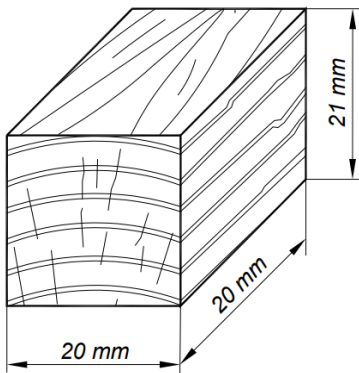
(a)

(b)

Resim 4.5. Deney örneklerinin deneylerden önce kondüsyonlanması (a, b)

Rutubet tayini

Rutubet tayini, TS EN 322 standardında belirtilen hususlara uygun olarak yapılmıştır. 20 x 20 x 21 mm boyutlarında hazırlanan deney örnekleri, kurutma fırınında 103 ± 2 °C sıcaklıkta değişmez kütleye ulaşmaya kadar kurutulmuştur (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Rutubet tayini deney örneği

6 saat ara ile yapılan tartımlarda, birbirini izleyen iki tartım arasındaki kütle farkının, deney örneği kütlelerinin %0,1'inden fazla olmaması durumuna gelindiğinde, bu kütle değişmez kütle olarak kabul edilmiştir. Her bir deney örneği kurutma fırınından çıkarılarak desikatörde soğutulduktan sonra 0,01 gram hassasiyetle ve %0,1'den daha fazla rutubet artışını önleyecek çabuklukta tartılmıştır.

Her deney örneğinin rutubet miktarı (r), yüzde olarak, %0,1 yaklaşımla hesaplanmıştır.

Rutubet miktarı (r);

$$r = \frac{m_H - m_O}{m_O} \times 100$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.

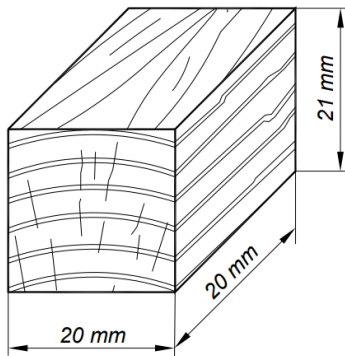
Burada;

m_H : Deney örneğinin alınma esnasındaki kütlesi (g),

m_O : Deney örneğinin kurutmadan sonraki kütlesi (g).

Yoğunluk tayini

Yoğunluk tayini TS EN 323 standardına göre yapılmıştır. 20 x 20 x 21 mm boyutlarında hazırlanan deney örneklerinin boyutları belirlenirken ölçme aleti, deney örneğinin yüzeylerine yavaş yavaş uygulanarak, deney örneğinin kalınlığı, t, 0,05 mm yaklaşımla ve örneğin köşegenlerinin kesiştiği noktadan ölçülmüştür. b_1 ve b_2 kenar uzunlukları deney parçasının kenarlarına paralel ve karşılıklı iki kenarın ortasından olmak üzere, 2 noktadan 0,1 mm hassasiyetle ölçülmüştür.



Şekil 4.3. Yoğunluk tayini deney örneği

Her deney örneğinin yoğunluğu “d” aşağıdaki formülle hesaplanmış ve g/cm³ olarak ifade edilmiştir.

Yoğunluk tayini (d);

$$d = \frac{m}{b_1 \times b_2 \times t} \times 10^4$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.

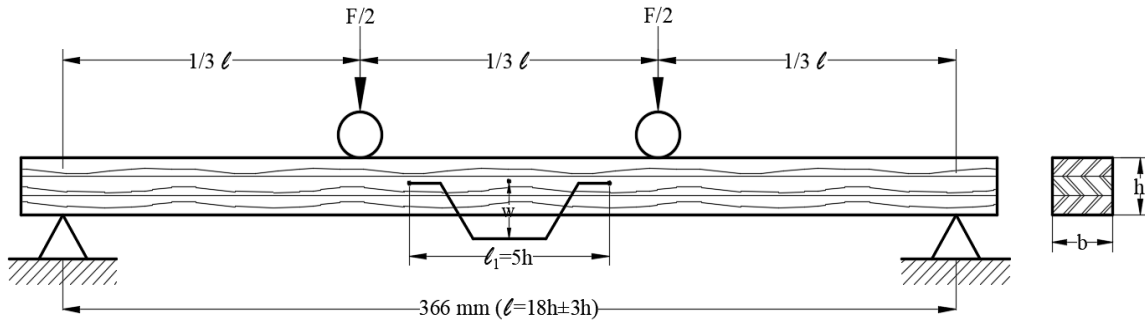
Burada;

m : Deney parçasının kütlesi (g),

b_1, b_2, t , deney parçasının boyutları (mm).

Eğilme dayanımı tayini

Deney örnekleri 400 x 30 x 21 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Deneylerin yapılması esnasında, TS EN 408+A1 standardına uygun olarak, yük noktaları ve mesnetler arası mesafeler örnek kalınlığının yaklaşık 18 katı olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 4.4). Deneylerde yükleme hızı 2 mm/dakika olarak ayarlanmış ve deneyler tamamlanincaya kadar bu ayar değiştirilmemiştir.



Şekil 4.4. Eğilme dayanımı deney örneği

Eğilme dayanımı (f_m);

$$f_m = \frac{3F_{max}a}{2bh^2}$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.

Burada;

f_m : Eğilme dayanımı (N/mm²),

F_{max} : Maksimum yük (N),

l_2 : Orta mesnetler arası uzaklık (126 mm),

b : Deney örneğinin enine kesit genişliği (30 mm),

a : Yük uygulama noktasından en yakın mesnet noktasına olan mesafe (mm),

h : Deney örneğinin kalınlığı (21 mm),

Eğilmede elastikiyet modülü tayini

Eğilmede elastikiyet modülü, TS EN 408+A1 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Eğilme deneyleri yapılırken, cihaz üzerine entegre edilen bir ekstansometre yardımıyla yer değiştirme (sehim) (w) miktarı ölçülerek etkilenmemiş eksende her iki yüzeydeki ölçümlerin ortalaması olarak hesaplanmıştır (Resim 4.6).



Resim 4.6. Eğilmede elastikiyet modülü deney düzeneği

Eğilmede elastikiyet modülü (E);

$$E = \frac{l^3 (F_2 - F_1) (l - l_1)^3}{4(W_2 - W_1)b_1 \cdot h_1^3}$$

Eşitliğinden hesaplanmıştır.

E : Eğilmede elastikiyet modülü (N/mm^2),

l : Mesnetler arası uzaklık (366 mm),

l_1 : Mesnetler arası uzaklık (126 mm),

b_1 : Deney örneğinin genişliği (30 mm),

h_1 : Deney örneğinin kalınlığı (21 mm),

$F_2 - F_1$: Yük deformasyon eğrisinin doğru kısmı üzerindeki yük oranının artışı N,

$W_2 - W_1$: $F_2 - F_1$ 'e karşılık gelen deformasyondaki artış, mm.

Basınç dayanımı

TS EN 408+A1 standardına göre ve liflere paralel olarak uygulanmıştır. Deney örneğinin en kesiti tam olarak ve deney örneğinin uzunluğu, daha küçük en kesitin boyutunun altı katı olacak şekilde ölçülendirilmiştir. Deney örneği ölçüleri 126 x 30 x 21 mm olarak hazırlanmıştır. Yük sabit bir hızda uygulanmış olup, yükleme başlığının yükleme hızı 2 mm/dakika olarak ayarlanmıştır (Resim 4.7).



Resim 4.7. Basınç dayanımı deney düzeneği

Basınç dayanımı ($f_{c,0}$);

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{A}$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.

Burada;

A : Kuvvetin uygulandığı enine kesit alanı (mm^2),

F_{max} : Kırılma anındaki maksimum kuvvet (N).

Dinamik eğilme dayanımı

TS ISO 13061-10 standardı esas alınarak pandürlü çarpma deney cihazı kullanılarak uygulanmıştır. Deney örnekleri, en kesiti 21x21 mm ve lif doğrultusunda boyu 300 mm olan kare dik prizma biçiminde hazırlanmıştır (Resim 4.8).

Dinamik eğilme dayanımı (σ_{DE});

$$\sigma_{DE} = \frac{w}{b \times h} = \text{kg.m/cm}^2$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.

Burada;

w : Harcanan enerji (kg.m),

b : Genişlik (cm),

h : Uzunluk (cm).

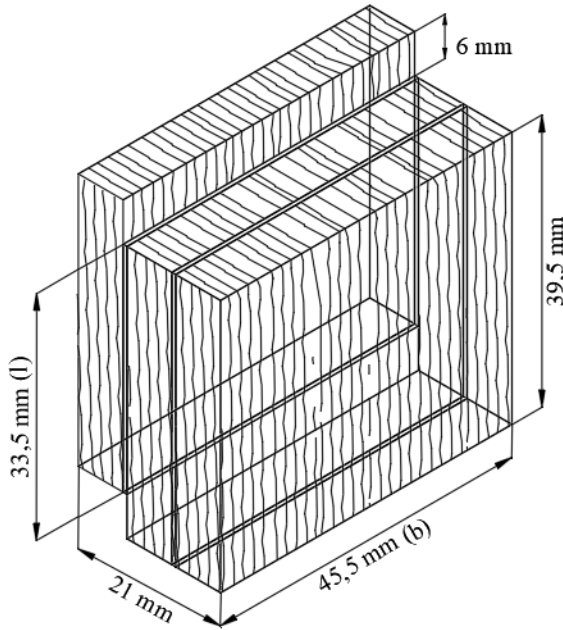


Resim 4.8. Dinamik eğilme dayanımı deney düzeneği

Makaslama dayanımı

Lif boylarına ve yapışma hattına paralel makaslama dayanımı tayini deney örnekleri ASTM D 3110 standart esaslarına uygun olarak 21 x 45,5 x 45,5 mm bindirme ölçüsü ise 33,5 mm boyutlarında hazırlanarak deneye tabi tutulmuştur (Keskin, 2001).

Lif Makaslama etki alanına maruz kalacak bölümün boyutları $\pm 0,01$ mm hassasiyetle ölçüm yapabilen kumpas ile belirlenmiştir. Makaslama dayanımı deneyinde yükleme hızı 2 mm/dakika olarak alınmıştır. uzunluğu ise 33,5 mm boyutlarında hazırlanarak deneye tabii tutulmuştur (Şekil 4.6 ve Resim 4.9).



Şekil 4.5. Makaslama dayanımı deney örneği

Hesaplama, deney esnasında maruz kalınan maksimum kuvvet (F_{max}) baz alınmıştır. Makaslama dayanımı (σ_m);

Makaslama dayanımı (σ_m);

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{b \cdot l} \text{ N/mm}^2$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.

Burada;

b: Makaslama yüzeyi genişliği (45,5 mm),

l : Makaslama yüzeyi uzunluğu (33,5 mm).



Resim 4.9. Makaslama dayanımı deney düzeneği

4.2.2. Verilerin değerlendirilmesi

Deneylerden elde edilen ham veriler PC için yazılmış MSTAT-C paket programında 0,95 güven düzeyinde değerlendirilmiştir. Ağaç türü, destek katmanı, katman sayısı ve tutkal çeşidinin lamine ahşap elemanı performansına etkilerini belirlemek için Varyans analizi (MANOVA) kullanılmış ve gruplar arası fark önemli çıktığında, Duncan testi ile ortalama değerler arasındaki fark karşılaştırılmıştır. Böylece, denemeye alınan faktörlerin birbirleri arasındaki başarı sıralamaları, en küçük önemli fark (LSD) kritik değerine göre homojenlik gruplarına ayrılmak suretiyle belirlenmiştir. Metin yazımında Microsoft Word, aritmetik ortalama, standart sapma hesaplamalarında ve grafik çizimlerinde Microsoft Excel, şekil çizimlerinde ise AutoCAD programları kullanılmıştır.



5. BULGULAR

5.1. Yoğunluk Sonuçları

3 ve 5 katmanlı olarak hazırlanan örnekler, 20 ± 2 °C ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem şartlarındaki iklimlendirme dolabında $\%12$ denge rutubetine ulaşınca kadar bekletildikten sonra belirlenen yoğunluk değerlerine ilişkin istatistiki veriler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Yoğunluk değerleri (g/cm^3)

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi	Katman Sayısı	Destek Katmanı	Min.	Maks.	$\bar{x}$	v
Sarıçam	Pol-D ₄	3	Karbon fiber k.	0,618	0,645	0,634	1,42
			Bambu kaplama	0,611	0,627	0,619	0,97
			Çelik tel	0,659	0,684	0,668	1,20
			Destek katmansız	0,569	0,593	0,584	1,54
		5	Karbon fiber k.	0,629	0,660	0,642	1,87
			Bambu kaplama	0,641	0,666	0,646	1,55
			Çelik tel	0,691	0,719	0,707	1,56
			Destek katmansız	0,610	0,653	0,629	2,54
	PVAc-D ₄	3	Karbon fiber k.	0,632	0,665	0,646	1,55
			Bambu kaplama	0,606	0,623	0,615	1,14
			Çelik tel	0,637	0,666	0,649	1,54
			Destek katmansız	0,616	0,639	0,629	1,59
		5	Karbon fiber k.	0,632	0,665	0,646	1,86
			Bambu kaplama	0,621	0,633	0,628	0,64
			Çelik tel	0,709	0,727	0,715	0,98
			Destek katmansız	0,579	0,609	0,596	2,01
Doğu kayını	Pol-D ₄	3	Karbon fiber k.	0,685	0,700	0,691	0,87
			Bambu kaplama	0,736	0,752	0,744	0,81
			Çelik tel	0,731	0,748	0,735	0,82
			Destek katmansız	0,672	0,687	0,679	0,88
		5	Karbon fiber k.	0,719	0,733	0,724	0,69
			Bambu kaplama	0,704	0,733	0,714	1,54
			Çelik tel	0,753	0,773	0,761	0,92
			Destek katmansız	0,687	0,700	0,695	0,72
	PVAc-D ₄	3	Karbon fiber k.	0,657	0,670	0,666	0,60
			Bambu kaplama	0,672	0,680	0,677	0,44
			Çelik tel	0,715	0,732	0,724	0,83
			Destek katmansız	0,632	0,654	0,642	1,40
		5	Karbon fiber k.	0,719	0,756	0,740	1,76
			Bambu kaplama	0,684	0,709	0,698	1,15
			Çelik tel	0,753	0,782	0,770	1,43
			Destek katmansız	0,672	0,717	0,688	2,47

$\bar{x}$: Aritmetik ortalama

v: Varyasyon katsayısı

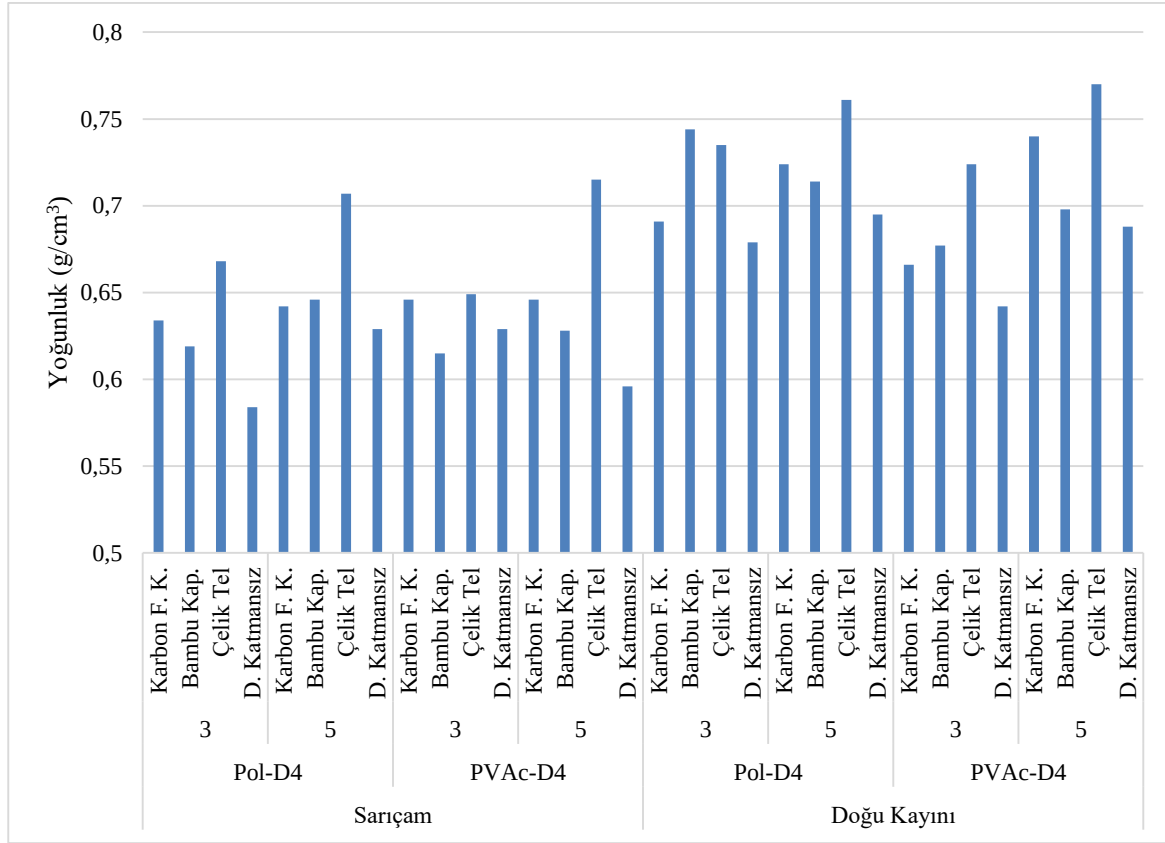
Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin yoğunluk değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Yoğunluk değeri; karbon fiber kumaşta 0,634 g/cm³, bambu kaplamada 0,619 g/cm³, çelik tel örgüde 0,668 g/cm³ ve destek katmansızda 0,584 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı sarıçam örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 0,642 g/cm³, bambu kaplamada 0,646 g/cm³, çelik tel örgüde 0,707 g/cm³ ve destek katmansızda 0,629 g/cm³ olarak tespit edilmiştir.

PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin yoğunluk değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Yoğunluk değeri; karbon fiber kumaşta 0,646 g/cm³, bambu kaplamada 0,615 g/cm³, çelik tel örgüde 0,649 g/cm³ ve destek katmansızda 0,629 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı sarıçam örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 0,646 g/cm³, bambu kaplamada 0,628 g/cm³, çelik tel örgüde 0,715 g/cm³ ve destek katmansızda 0,596 g/cm³ olarak tespit edilmiştir.

Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin yoğunluk değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Yoğunluk değeri; karbon fiber kumaşta 0,691 g/cm³, bambu kaplamada 0,744 g/cm³, çelik tel örgüde 0,735 g/cm³ ve destek katmansızda 0,679 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 0,724 g/cm³, bambu kaplamada 0,714 g/cm³, çelik tel örgüde 0,761 g/cm³ ve destek katmansızda 0,695 g/cm³ olarak tespit edilmiştir.

PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin yoğunluk değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Yoğunluk değeri; karbon fiber kumaşta 0,666 g/cm³, bambu kaplamada 0,677 g/cm³, çelik tel örgüde 0,724 g/cm³ ve destek katmansızda 0,642 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 0,740 g/cm³, bambu kaplamada 0,698 g/cm³, çelik tel örgüde 0,770 g/cm³ ve destek katmansızda 0,688 g/cm³ olarak tespit edilmiştir.

Tüm değişkenleri kapsayan aritmetik ortalamalar esas alınarak oluşturulan grafik, Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Yoğunluk değerleri (g/cm³)

5.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları

Eğilme dayanımına ilişkin istatistiki değerler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Eğilme dayanımı istatistiki değerleri (N/mm²)

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi	Katman Sayısı	Destek Katmanı	Min.	Maks.	$\bar{x}$	v
Sarıçam	Pol-D ₄	3	Karbon fiber kumaş	108,0	127,7	119,7	6,02
			Bambu kaplama	121,0	134,8	127,0	4,02
			Çelik tel	103,6	108,0	106,2	1,22
			Destek katmansız	79,9	105,0	98,2	8,25
		5	Karbon fiber kumaş	104,0	125,0	114,2	6,04
			Bambu kaplama	108,0	135,0	120,0	6,67
			Çelik tel	102,0	111,3	105,3	2,56
			Destek katmansız	63,2	104,0	82,2	18,61
	PVAc-D ₄	3	Karbon fiber kumaş	78,0	104,6	96,4	7,68
			Bambu kaplama	110,0	124,0	118,9	3,20
			Çelik tel	89,5	120,0	105,9	9,54
			Destek katmansız	91,9	105,0	97,4	4,00
		5	Karbon fiber kumaş	92,3	104,0	96,8	3,62
			Bambu kap.	96,7	109,0	100,2	3,39
			Çelik tel	87,3	98,5	94,3	3,82
			Destek katmansız	80,1	101,0	93,8	5,97
Doğu kayını	Pol-D ₄	3	Karbon fiber kumaş	103,2	114,0	107,2	3,73
			Bambu kaplama	119,0	145,4	135,1	6,22
			Çelik tel	119,7	139,7	129,3	4,95
			Destek katmansız	105,0	142,9	126,0	8,73
		5	Karbon fiber kumaş	132,0	148,0	141,3	3,11
			Bambu kaplama	131,0	156,3	141,6	5,16
			Çelik tel	112,0	131,0	120,8	4,39
			Destek katmansız	110,0	129,8	119,8	5,34
	PVAc-D ₄	3	Karbon fiber kumaş	71,5	96,5	82,2	12,41
			Bambu kaplama	112,0	132,0	120,1	5,16
			Çelik tel	93,3	108,0	100,0	5,70
			Destek katmansız	108,0	119,0	112,4	3,20
		5	Karbon fiber kumaş	93,1	108,1	102,2	4,21
			Bambu kaplama	132,0	149,0	136,5	3,74
			Çelik tel	97,9	112,0	105,4	3,70
			Destek katmansız	121,0	138,0	131,7	4,02

Çizelge 5.2'ye göre, eğilme dayanımı aritmetik ortalama değerleri; ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı deney örnekleri arasında farklı bulunmuştur.

Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin eğilme dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Eğilme dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 119,7 N/mm², bambu kaplamada 127,0 N/mm², çelik tel örgüde 106,2 N/mm² ve destek katmansızda 98,2 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı sarıçam örneklerde ise

karbon fiber kumaşta 114,2 N/mm², bambu kaplamada 120,0 N/mm², elik tel örgüde 105,3 N/mm² ve destek katmansızda 82,2 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

PVAc–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin eğilme dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Eğilme dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 96,4 N/mm², bambu kaplamada 118,9 N/mm², elik tel örgüde 105,9 N/mm² ve destek katmansızda 97,4 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı sarıçam örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 96,8 N/mm², bambu kaplamada 100,2 N/mm², elik tel örgüde 94,3 N/mm² ve destek katmansızda 93,8 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

Pol–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin eğilme dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Eğilme dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 107,2 N/mm², bambu kaplamada 135,1 N/mm², elik tel örgüde 129,3 N/mm² ve destek katmansızda 126,0 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 141,3 N/mm², bambu kaplamada 141,6 N/mm², elik tel örgüde 120,98 N/mm² ve destek katmansızda 119,8 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

PVAc–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin eğilme dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Eğilme dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 82,2 N/mm², bambu kaplamada 120,1 N/mm², elik tel örgüde 100,0 N/mm² ve destek katmansızda 112,4 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 102,2 N/mm², bambu kaplamada 136,5 N/mm², elik tel örgüde 105,4 N/mm² ve destek katmansızda 131,7 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

Ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı ile bu bağımsız değişkenlerin ikili, üçlü ve dörtlü etkileşimlerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkilerine ilişkin çoklu varyans analizi sonuçları izelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Eğilme dayanımına ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı etkisine ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P≤0,05
Ağaç Türü (A)	1	17254,875	17254,875	387,870	0,0000*
Tutkal Çeşidi (B)	1	12477,511	12477,511	280,480	0,0000*
Etkileşim (AB)	1	1180,416	1180,416	26,534	0,0000*
Katman Sayısı (C)	1	182,408	182,408	4,100	0,0438*
Etkileşim (AC)	1	7008,768	7008,768	157,549	0,0000*
Etkileşim (BC)	1	298,764	298,764	6,716	0,0100*
Etkileşim (ABC)	1	479,220	479,220	10,772	0,0012*
Destek katmanı (D)	3	17484,144	5828,048	131,008	0,0000*
Etkileşim (AD)	3	8293,811	2764,604	62,145	0,0000*
Etkileşim (BD)	3	8194,612	2731,537	61,402	0,0000*
Etkileşim (ABD)	3	1172,489	390,830	8,785	0,0000*
Etkileşim (CD)	3	3191,447	1063,816	23,913	0,0000*
Etkileşim (ACD)	3	1748,252	582,751	13,100	0,0000*
Etkileşim (BCD)	3	1597,292	532,431	11,968	0,0000*
Etkileşim (ABCD)	3	1572,252	524,084	11,781	0,0000*
Hata	288	12812,026	44,486		
Toplam	319	94948,287			

*: Fark, 0,05'e göre anlamlı

Eğilme dayanımında ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı, destek katmanı ve bu faktörlerin karşılıklı etkileşimleri istatistiki anlamda önemlidir ($\alpha=0,05$).

3 ve üzeri değişken içeren faktörlerin başarı sıralamaları Duncan testi ile yapılmış, 2 değişkenli faktörler ise aritmetik ortalamalara göre değerlendirilmiştir.

Ağaç türü düzeyinde, en yüksek eğilme dayanımı Doğu kayınında ($119,5 \text{ N/mm}^2$), en düşük ise sarıçamda ($104,8 \text{ N/mm}^2$) tespit edilmiştir. Tutkal çeşidi düzeyinde, en yüksek eğilme dayanımı Pol-D₄ tutkalında ($118,4 \text{ N/mm}^2$), en düşük ise PVAc-D₄ ($105,9 \text{ N/mm}^2$) tespit edilmiştir. Katman düzeyinde ise en yüksek eğilme dayanımı 5 katmanlı örneklerde ($112,9 \text{ N/mm}^2$), en düşük ise 3 katmanlı örneklerde ($111,4 \text{ N/mm}^2$) tespit edilmiştir.

Faktörler bakımından 3 ve üzeri değişken içeren faktörlere Duncan testi uygulanmış olup 2 ve altı değişken içeren faktörlerin eğilme dayanımı değerleri verilmiştir.

Ağaç türü-tutkal çeşidi ikili etkileşiminde elde edilen eğilme dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Ağaç türü-tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	109,1	C	100,5	D**
D. Kayını	127,6	A*	111,3	B
LSD $\pm$ 2,075				

$\bar{x}$: Aritmetik ort. HG: Homojenlik grubu *: En yüksek eğilme dayanımı **: En düşük eğilme dayanımı

Çizelge 5.4'e göre, en yüksek eğilme dayanımı Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan Doğu kayınında (127,6 N/mm²) elde edilmiş, bunu sırasıyla PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan Doğu kayını (111,3 N/mm²), Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan sarıçam (109,1 N/mm²) ve PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan sarıçam (100,5 N/mm²) örnekler takip etmiştir.

Ağaç türü-katman sayısı ikili etkileşiminde elde edilen eğilme dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Ağaç türü-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Katman Sayısı	Ağaç Türü			
	Sarıçam		Doğu Kayını	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	108,7	C	114,0	B
5	100,9	D**	124,9	A*
LSD $\pm$ 2,075				

Çizelge 5.5'e göre, en yüksek eğilme dayanımı 5 katmanlı Doğu kayınında (124,9 N/mm²) elde edilmiş, bunu sırasıyla 3 katmanlı Doğu kayını (114 N/mm²), 3 katmanlı sarıçam (108,7 N/mm²) ve 5 katmanlı sarıçam (100,9 N/mm²) örnekler takip etmiştir.

Tutkal çeşidi-katman sayısı ikili etkileşiminde elde edilen eğilme dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Tutkal çeşidi–katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Katman Sayısı	Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	118,6	A*	104,2	C**
5	118,2	A	107,6	B
LSD $\pm$ 2,075				

Çizelge 5.6’ya göre, en yüksek eğilme dayanımı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı örneklerde (118,6 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı örneklerde (104,2 N/mm²) tespit edilmiştir. Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 ve 5 katmanlı örnekler arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-tutkal çeşidi–katman sayısı üçlü etkileşiminde elde edilen eğilme dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Ağaç türü-tutkal çeşidi–katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Tutkal Çeşidi	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Katman Sayısı				Katman Sayısı			
	3		5		3		5	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Pol-D ₄	112,8	D	105,4	E	124,4	B	130,9	A*
PVAc-D ₄	104,6	E	96,3	F**	103,7	E	118,9	C
LSD $\pm$ 2,934								

Çizelge 5.7’ye göre, en yüksek eğilme dayanımı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 5 katmanlı Doğu kayınında (130,9 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 5 katmanlı sarıçamda (96,3 N/mm²) tespit edilmiştir. PVAc-D₄ tutkalı ile yapıştırılan; 3 ve 5 katmanlı sarıçam örnekler ile 3 katmanlı Doğu kayını örnekler arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Destek katmanı düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Destek Katmanı							
Karbon Fiber K.		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
107,5	B**	124,9	A*	108,4	B	107,7	B
LSD $\pm$ 2,075							

Çizelge 5.8’e göre, en yüksek eğilme dayanımı bambu kaplamada (124,9 N/mm²) elde edilmiştir. Çelik tel (108,4 N/mm²), karbon fiber kumaş (107,5 N/mm²) ve destek katmansız (107,7 N/mm²) arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen eğilme dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.9’da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Ağaç türü-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Ağaç Türü	Destek Katmanı							
	Karbon Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	106,8	D	116,5	C	102,9	E	92,9	F**
D. Kayını	108,2	D	133,3	A*	113,9	C	122,4	B
LSD $\pm$ 2,934								

Çizelge 5.9’a göre, en yüksek eğilme dayanımı bambu kaplama destek katmanlı Doğu kayını (133,3 N/mm²), en düşük ise destek katmansız sarıçamda (92,9 N/mm²) tespit edilmiştir. Karbon fiber kumaş destek katmanlı; sarıçam ile Doğu kayını örnekler arasındaki fark, bambu kaplama destek katmanlı sarıçam ile çelik örgü tel destek katmanlı Doğu kayını arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Tutkal çeşidi-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen eğilme dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.10’da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Tutkal çeşidi–destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Tutkal Çeşidi	Destek Katmanı							
	Karbon Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Pol-D ₄	120,6	B	130,9	A*	115,4	C	106,5	D
PVAc-D ₄	94,4	F**	118,9	B	101,4	E	108,8	D
LSD $\pm$ 2,934								

Çizelge 5.10’a göre, en yüksek eğilme dayanımı; Pol-D₄ bambu kaplama destek katmanlıda (130,9 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ karbon fiber kumaş destek katmanlıda (94,4 N/mm²) tespit edilmiştir. Destek katmansız; Pol-D₄ ile PVAc-D₄ arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı üçlü etkileşiminde elde edilen eğilme dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.11’de verilmiştir.

Çizelge 5.11. Ağaç türü–tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Destek Katmanı	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Tutkal Çeşidi				Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄		Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Karbon Fib. K.	117,0	D	96,6	HI	124,3	BC	92,2	JK
Bambu Kap.	123,5	C	109,5	EF	138,3	A*	128,3	B
Çelik Tel	105,8	EF	100,1	GH	125,1	BC	102,7	FG
D. Katmansız	90,2	K**	95,6	IJ	122,9	C	122,0	C
LSD $\pm$ 4,150								

Çizelge 5.11’e göre, en yüksek eğilme dayanımı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan bambu kaplama destek katmanlı Doğu kayınında (138,3 N/mm²), en düşük ise Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan destek katmansız sarıçamda (90,2 N/mm²) tespit edilmiştir.

Katman sayısı-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen eğilme dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.12’de verilmiştir.

Çizelge 5.12. Katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Katman Sayısı	Destek Katmanı							
	Karbon Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	101,4	E**	125,3	A*	110,4	C	108,5	CD
5	113,6	B	124,6	A	106,5	D	106,8	D
LSD $\pm$ 2,934								

Çizelge 5.12’ye göre, en yüksek eğilme dayanımı 3 katmanlı bambu kaplama destek katmanlıda (125,3 N/mm²), en düşük ise 3 katmanlı karbon fiber kumaş destek katmanlıda (101,4 N/mm²) tespit edilmiştir. 5 katmanlı; çelik tel destek katmanlı ve destek katmansız örnekler arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

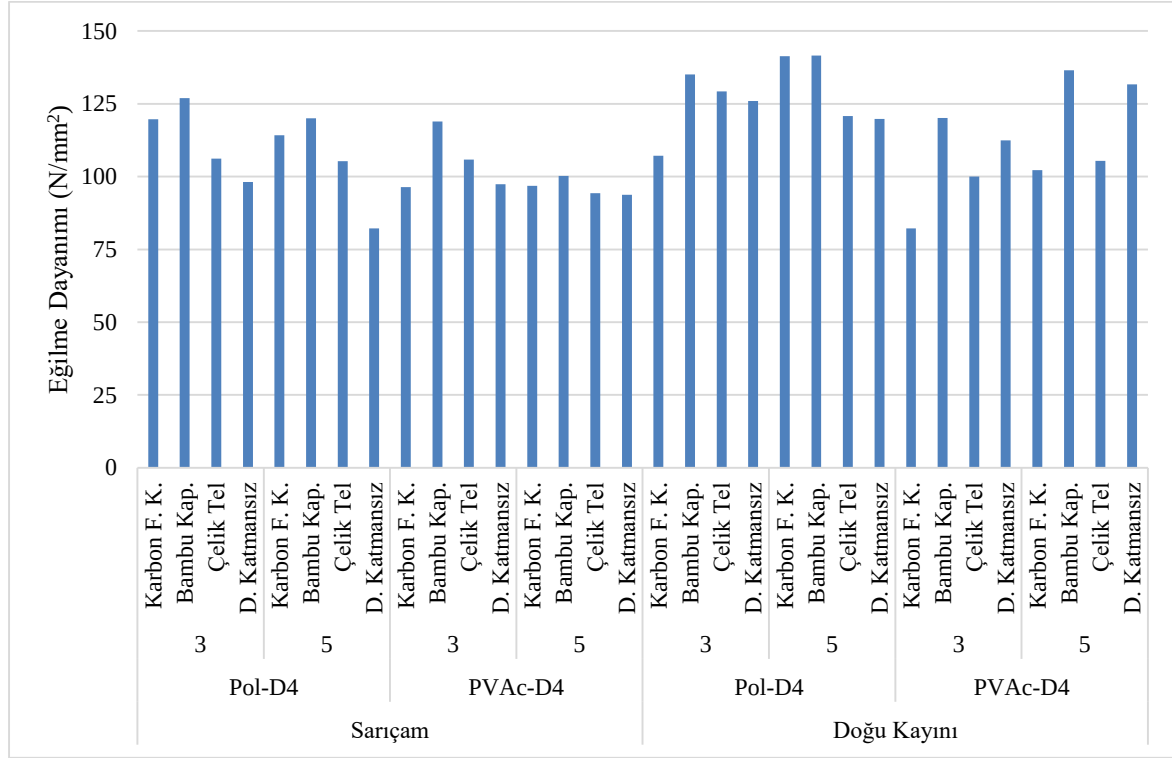
Ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı üçlü etkileşiminde elde edilen eğilme dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.13’te verilmiştir.

Çizelge 5.13. Ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Destek Katmanı	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Katman Sayısı				Katman Sayısı			
	3		5		3		5	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Karbon F. K.	108,0	GH	105,5	H	94,71	J	121,8	CD
Bambu Kap.	122,9	CD	110,1	FG	127,6	B	139,0	A*
Çelik Tel	106,1	GH	99,8	I	114,6	E	113,1	EF
D. Katmansız	97,8	IJ	88,0	K**	119,2	D	125,7	BC
LSD $\pm$ 4,150								

Çizelge 5.13’e göre, en yüksek eğilme dayanımı 5 katmanlı, bambu kaplama destek katmanlı Doğu kayınında (139,0 N/mm²), en düşük ise 5 katmanlı destek katmansız sarıçamda (88,0 N/mm²) tespit edilmiştir.

Çizelge 5.15'e göre, en yüksek eğilme dayanımı 5 katmanlı Pol-D4 tutkal ile yapıştırılan bambu kaplama destek katmanlı Doğu kayınında ($141,6 \text{ N/mm}^2$), en düşük ise 5 katmanlı Pol-D4 tutkal ile yapıştırılan destek katmansız sarıçamda ($82,2 \text{ N/mm}^2$) tespit edilmiştir.



Şekil 5.2. Eğilme dayanımı değerleri (N/mm^2)

Ayrıca, eğilme dayanımı bakımından farklı destek katmanları ile güçlendirilerek lamine edilmiş ağaç malzemedan hazırlanan deney örnekleri ile masif olarak hazırlanan deney örneklerinin değişim yüzdeleri Çizelge 5.16'da verilmiştir.

Çizelge 5.16. Eğilme dayanımı bakımından masife kıyasla değişim yüzdeleri (%)

Ağaç Türü	Katman Sayısı	Destek Katmanı	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)					
			Pol-D ₄			PVAc-D ₄		
			f_m (N/mm ²)	Masif (N/mm ²)	Değişim (%)	f_m (N/mm ²)	Masif (N/mm ²)	Değişim (%)
Sarıçam	3 Katman	Karbon Fib. K.	119,7	93,9	27,5	96,4	93,9	2,7
		Bambu Kap.	127,0		35,2	118,9		26,6
		Çelik Tel	106,2		13,1	105,9		12,8
		D. Katmansız	98,2		4,6	97,4		3,7
	5 Katman	Karbon Fib. K.	114,2		21,6	96,8		3,1
		Bambu Kap.	120,0		27,8	100,2		6,7
		Çelik Tel	105,3		12,1	94,3		0,42
		D. Katmansız	82,2		-12,5	93,8		-0,11
Doğu Kayını	3 Katman	Karbon Fib. K.	107,2	106,7	0,47	82,2	106,7	-23,0
		Bambu Kap.	135,1		26,6	120,1		12,6
		Çelik Tel	129,3		21,2	100,0		-6,3
		D. Katmansız	126,0		18,1	112,4		5,3
	5 Katman	Karbon Fib. K.	141,3		32,4	102,2		-4,2
		Bambu Kap.	141,6		32,7	136,5		27,9
		Çelik Tel	120,8		13,2	105,4		-1,2
		D. Katmansız	119,8		12,3	131,7		23,4

Eğilme dayanımı bakımından masife kıyasla en yüksek yüzde değişimi 3 katmanlı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan bambu kaplama destek katmanlı sarıçamda (%35,2), en düşük yüzde değişimi ise 3 katmanlı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında (-%23,0) elde edilmiştir.

5.3. Eğilmede Elastikiyet Modülü Sonuçları

Eğilmede elastikiyet modülüne ilişkin istatistiki değerler Çizelge 5.17’de verilmiştir

Çizelge 5.17. Eğilmede elastikiyet modülü istatistiki değerleri (N/mm²)

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi	Katman Sayısı	Destek Katmanı	Min.	Maks.	$\bar{x}$	v
Sarıçam	Pol-D ₄	3	Karbon fib. k.	7088,12	9588,10	8343,32	8,02
			Bambu kap.	8506,85	9902,54	9095,98	4,43
			Çelik tel	6438,08	8126,32	7421,42	6,38
			D. katmansız	3761,94	6890,22	5985,79	14,95
		5	Karbon fib. k.	7452,09	8955,77	8175,07	6,84
			Bambu kap.	7507,69	10225,07	8775,16	10,26
			Çelik tel	5661,82	7314,51	6383,84	9,80
			D. katmansız	3688,73	6140,42	4937,44	18,39
	PVAc-D ₄	3	Karbon fib. k.	4883,42	5877,50	5422,79	5,76
			Bambu kap.	7309,96	10326,98	8865,70	10,69
			Çelik tel	6116,77	8960,67	6608,70	14,75
			D. katmansız	5679,77	7231,33	6355,77	7,99
		5	Karbon fib. k.	4862,68	7548,38	5772,24	12,00
			Bambu kap.	7007,15	8335,99	7496,29	5,81
			Çelik tel	4861,50	7046,88	5662,94	12,64
			D. katmansız	4991,98	5987,17	5485,96	6,15
Doğu Kayını	Pol-D ₄	3	Karbon fib. k.	6085,58	7047,81	6535,48	6,15
			Bambu kap.	7144,59	8238,07	7844,90	5,30
			Çelik tel	6569,62	7500,57	6907,89	3,72
			D. katmansız	5533,63	6800,90	5990,43	6,63
		5	Karbon fib. k.	7822,18	9163,66	8345,76	4,21
			Bambu kap.	8089,97	9171,30	8517,17	4,67
			Çelik tel	5713,58	7115,76	6484,02	6,17
			D. katmansız	6154,28	7235,36	6606,67	5,84
	PVAc-D ₄	3	Karbon fib. k.	3466,59	4677,74	3925,94	11,56
			Bambu kap.	5309,61	6621,71	6100,94	7,97
			Çelik tel	4863,22	5882,57	5351,68	5,60
			D. katmansız	4741,17	6057,92	5484,22	7,25
		5	Karbon fib. k.	4060,83	5537,07	4769,25	12,19
			Bambu kap.	7672,54	9257,75	8344,56	5,52
			Çelik tel	4987,81	6258,96	5819,11	7,15
			D. katmansız	6573,08	7779,10	7177,23	4,72

Çizelge 5.17'ye göre, eğilmede elastikiyet modülü aritmetik ortalama değerleri; ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı deney örnekleri arasında farklı bulunmuştur.

Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Eğilmede elastikiyet modülü değeri; karbon fiber kumaşta 8343,32 N/mm², bambu kaplamada 9095,98 N/mm², çelik tel örgüde 7421,42 N/mm² ve destek katmansızda 5985,79 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5

katmanlı sarıçam örneklerde ise; karbon fiber kumaşta $8175,07 \text{ N/mm}^2$, bambu kaplamada $8775,16 \text{ N/mm}^2$, çelik tel örgüde $6383,84 \text{ N/mm}^2$ ve destek katmansızda $4937,44 \text{ N/mm}^2$ olarak tespit edilmiştir.

PVAc–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Eğilmede elastikiyet modülü değeri; karbon fiber kumaşta $5422,79 \text{ N/mm}^2$, bambu kaplamada $8865,70 \text{ N/mm}^2$, çelik tel örgüde $7608,70 \text{ N/mm}^2$ ve destek katmansızda $6355,77 \text{ N/mm}^2$ olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı sarıçam örneklerde ise; karbon fiber kumaşta $5772,24 \text{ N/mm}^2$, bambu kaplamada $7496,29 \text{ N/mm}^2$, çelik tel örgüde $5662,94 \text{ N/mm}^2$ ve destek katmansızda $5485,96 \text{ N/mm}^2$ olarak tespit edilmiştir.

Pol–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Eğilmede elastikiyet modülü değeri; karbon fiber kumaşta $6535,48 \text{ N/mm}^2$, bambu kaplamada $7844,90 \text{ N/mm}^2$, çelik tel örgüde $6907,89 \text{ N/mm}^2$ ve destek katmansızda $5990,43 \text{ N/mm}^2$ olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta $8345,76 \text{ N/mm}^2$, bambu kaplamada $8517,17 \text{ N/mm}^2$, çelik tel örgüde $6484,02 \text{ N/mm}^2$ ve destek katmansızda $6606,67 \text{ N/mm}^2$ olarak tespit edilmiştir.

PVAc–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin eğilmede elastikiyet modülü değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Eğilmede elastikiyet modülü değeri; karbon fiber kumaşta $3925,94 \text{ N/mm}^2$, bambu kaplamada $6100,94 \text{ N/mm}^2$, çelik tel örgüde $5351,68 \text{ N/mm}^2$ ve destek katmansızda $5484,22 \text{ N/mm}^2$ olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta $4769,25 \text{ N/mm}^2$, bambu kaplamada $8344,56 \text{ N/mm}^2$, çelik tel örgüde $5819,11 \text{ N/mm}^2$ ve destek katmansızda $7177,23 \text{ N/mm}^2$ olarak tespit edilmiştir.

Ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı ile bu bağımsız değişkenlerin ikili, üçlü ve dörtlü etkileşimlerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkilerine ilişkin çoklu varyans analizi sonuçları Çizelge 5.18’de verilmiştir.

Çizelge 5.18. Eğilmede elastikiyet modülüne ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanının etkisine ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Ser. Der.	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P≤0,05
Ağaç Türü (A)	1	18355707,430	18355707,430	58,792	0,0000*
Tutkal Çeşidi (B)	1	88072985,250	88072985,250	282,091	0,0000*
Etkileşim (AB)	1	4349775,164	4349775,164	13,932	0,0002*
Katman Sayısı (C)	1	641400,986	641400,986	2,054	0,1529*
Etkileşim (AC)	1	64907296,650	64907296,650	207,893	0,0000*
Etkileşim (BC)	1	604642,608	604642,608	1,936	0,1651*
Etkileşim (ABC)	1	4403637,162	4403637,162	14,1045	0,0002*
Destek katmanı (D)	3	212623890,819	70874630,273	227,006	0,0000*
Etkileşim (AD)	3	34220862,462	11406954,154	36,536	0,0000*
Etkileşim (BD)	3	105188601,540	35062867,180	112,304	0,0000*
Etkileşim (ABD)	3	1091204,884	363734,961	1,165	0,3234*
Etkileşim (CD)	3	21709849,906	7236616,635	23,178	0,0000*
Etkileşim (ACD)	3	3 3541042,594	1180347,531	3,781	0,0110*
Etkileşim (BCD)	3	1877526,159	625842,053	2,004	0,1135*
Etkileşim (ABCD)	3	12296883,142	4098961,047	13,129	0,0000*
Hata	288	89917879,125	312214,858	13,129	
Toplam	319	663803185,882			

Varyans kaynaklarının eğilmede elastikiyet modülü etkileri bakımından gruplar arası farklılık ağaç türü, tutkal çeşidi, ağaç türü–tutkal çeşidi ikili etkileşimi, ağaç türü–katman sayısı ikili etkileşimi, ağaç türü–tutkal çeşidi–katman sayısı üçlü etkileşimi, destek katmanı, ağaç türü–destek katmanı ikili etkileşimi, tutkal çeşidi–destek katmanı ikili etkileşimi, katman sayısı–destek katmanı ikili etkileşimi, ağaç türü–katman sayısı–destek katmanı üçlü etkileşimi ve ağaç türü–tutkal çeşidi–katman sayısı–destek katmanı dördü etkileşimi düzeyinde istatistiki anlamda önemli bulunmuştur ($\alpha \leq 0,05$).

Varyans kaynaklarından katman sayısı, tutkal çeşidi–katman sayısı ikili etkileşimi, ağaç türü–tutkal çeşidi–destek katmanı üçlü etkileşimi ve tutkal çeşidi–katman sayısı–destek katmanı üçlü etkileşiminin farklı destek katmanları ile güçlendirilerek lamine edilmiş ağaç malzemenin eğilmede elastikiyet modülü üzerinde etkili olmadığı görülmektedir.

3 ve üzeri değişken içeren faktörlerin başarı sıralamaları Duncan testi ile yapılmış, 2 değişkenli faktörler ise aritmetik ortalamalara göre değerlendirilmiştir.

Ağaç türü düzeyinde, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü Doğu kayınında (6991,83 N/mm²), en düşük ise sarıçamda (6511,83 N/mm²) tespit edilmiştir. Tutkal çeşidi düzeyinde, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü Pol-D₄ tutkalında (7276,95 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ (6227,71 N/mm²) tespit edilmiştir.

Ağaç türü-tutkal çeşidi ikili etkileşiminde elde edilen eğilmede elastikiyet modülünde farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.19’da verilmiştir.

Çizelge 5.19. Ağaç türü-tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	7400	A*	6584	C
D. Kayını	7154	B	5872	D**
LSD $\pm$ 173,8				

$\bar{x}$: Aritmetik ort. HG: Homojenlik grubu *: En yüksek elastikiyet modülü **: En düşük elastikiyet modülü

Çizelge 5.19’a göre, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan sarıçamda (7400 N/mm²) elde edilmiş, bunu sırasıyla Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan Doğu kayını (7154 N/mm²), PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan sarıçam (6584 N/mm²), ve PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan Doğu kayını (5872 N/mm²) örnekler takip etmiştir.

Ağaç türü-katman sayısı ikili etkileşiminde elde edilen eğilmede elastikiyet modülüne farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.20’de verilmiştir.

Çizelge 5.20. Ağaç türü–katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Katman Sayısı	Ağaç Türü			
	Sarıçam		Doğu Kayını	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	7397	A*	6018	D**
5	6586	C	7008	B
LSD $\pm$ 173,8				

Çizelge 5.20'ye göre, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü 3 katmanlı sarıçamda (7397 N/mm²) elde edilmiş, bunu sırasıyla 5 katmanlı Doğu kayını (7008 N/mm²), 5 katmanlı sarıçam (6586 N/mm²) ve 3 katmanlı Doğu kayını (6018 N/mm²) örnekler takip etmiştir. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı üçlü etkileşiminde elde edilen eğilmede elastikiyet modülünde farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.21'de verilmiştir.

Çizelge 5.21. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Tutkal Çeşidi	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Katman Sayısı				Katman Sayısı			
	3		5		3		5	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Pol-D ₄	7732	A*	7068	B	6820	B	7488	A
PVAc-D ₄	7063	B	6104	D	5216	E**	6528	C
LSD ± 245,8								

Çizelge 5.21'e göre, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçamda (7732 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayınında (5216 N/mm²) tespit edilmiştir. Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan; 3 katmanlı Doğu kayını ve 5 katmanlı sarıçam örnekler ile PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Sarıçam örnekler arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Destek katmanı düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.22'de verilmiştir.

Çizelge 5.22. Destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Destek Katmanı							
Karbon Fiber K.		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
6421	B	8130	A*	6455	B	6003	C**
LSD ± 173,8							

Çizelge 5.22'ye göre, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü bambu kaplamada (8130 N/mm²) elde edilmiştir. Çelik tel (6455 N/mm²) ve karbon fiber kumaş (6003 N/mm²) arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen eğilmede elastikiyet modülünde farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.23'te verilmiştir.

Çizelge 5.23. Ağaç türü-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Ağaç Türü	Destek Katmanı							
	Karbon Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	6948	C	8558	A*	6769	C	5691	E**
D. Kayını	5894	E	7702	B	6141	D	6315	D
LSD $\pm$ 245,8								

Çizelge 5.28'e göre, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü bambu kaplama destek katmanlı sarıçamda (8558 N/mm²), en düşük ise destek katmansız sarıçamda (5691 N/mm²) tespit edilmiştir. Karbon fiber kumaş destek katmanlı sarıçam ile çelik tel destek katmanlı sarıçam örnekler arasındaki fark, çelik tel katmanlı Doğu kayını örnekler ile destek katmansız Doğu kayını örnekler arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Tutkal çeşidi-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen eğilmede elastikiyet modülünde farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.24'te verilmiştir.

Çizelge 5.24. Tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Tutkal Çeşidi	Destek Katmanı							
	Karbon Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Pol-D ₄	7870	B	8558	A*	6800	C	5880	D
PVAc-D ₄	4973	E**	7702	B	6111	D	6126	D
LSD $\pm$ 245,8								

Çizelge 5.24'e göre, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü; Pol-D₄ bambu kaplama destek katmanlıda (8558 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ karbon fiber kumaş destek katmanlıda (4973 N/mm²) tespit edilmiştir. Destek katmansız; Pol-D₄ ile PVAc-D₄ örnekler arasındaki fark, Pol-D₄ karbon fiber kumaş destek katmanlı ile PVAc-D₄ bambu kaplama destek katmanlı örnekler arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Katman sayısı-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen eğilmede elastikiyet modülünde farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.25’de verilmiştir.

Çizelge 5.25. Katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Katman Sayısı	Destek Katmanı							
	Karbon Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	6077	D	7977	B	6822	C	5954	D**
5	6766	C	8283	A*	6088	D	6052	D
LSD $\pm$ 245,8								

Çizelge 5.25’e göre, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü 5 katmanlı bambu kaplama destek katmanlıda (8283 N/mm²), en düşük ise 3 katmanlı destek katmansızda (5954 N/mm²) tespit edilmiştir. 5 katmanlı; çelik tel destek katmanlı ve destek katmansız örnekler arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı üçlü etkileşiminde elde edilen eğilmede elastikiyet modülünde farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.26’da verilmiştir.

Çizelge 5.26. Ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Destek Katmanı	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Katman Sayısı				Katman Sayısı			
	3		5		3		5	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Karbon F. K.	6923	DE	6974	D	5231	H	6558	E
Bambu Kap.	8981	A*	8136	B	6973	D	8431	B
Çelik Tel	7515	C	6024	FG	6130	F	6152	F
D. Katmansız	6171	F	5212	H**	5737	G	6892	DE
LSD $\pm$ 347,6								

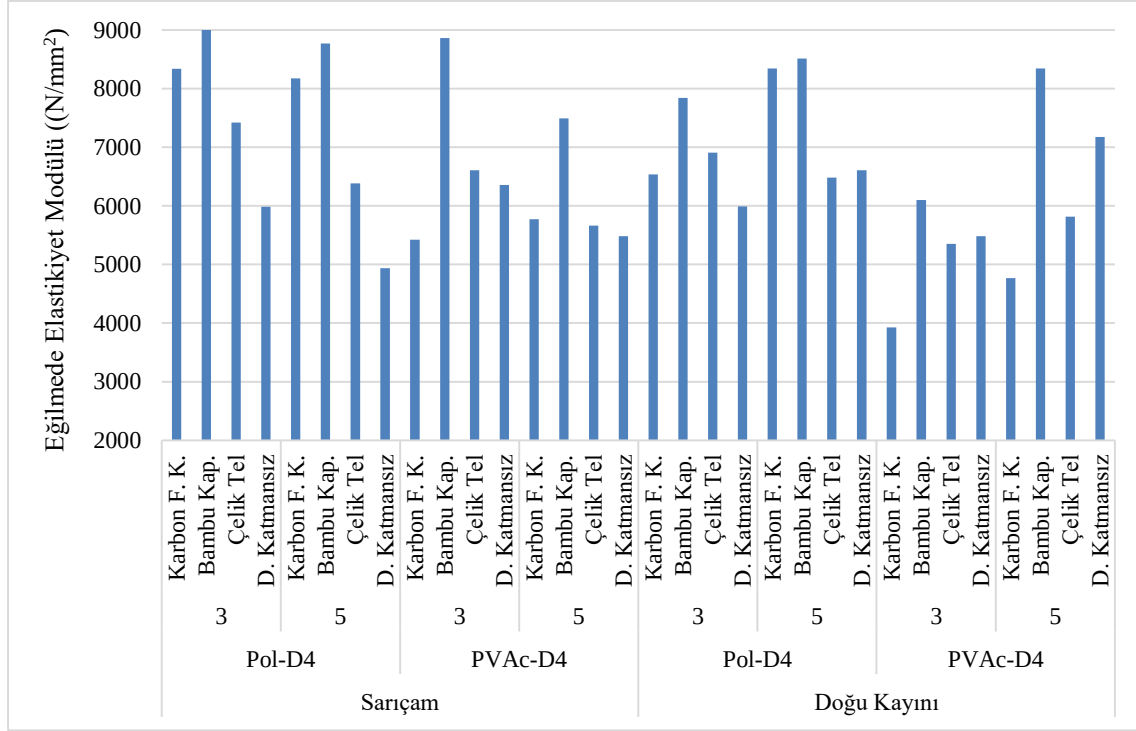
Çizelge 5.26’ya göre, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü 3 katmanlı, bambu kaplama destek katmanlı sarıçamda (8981 N/mm²), en düşük ise 5 katmanlı destek katmansız sarıçamda (5212 N/mm²) tespit edilmiştir.

Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı dördlü etkileşiminde elde edilen eğilmede elastikiyet modülünde farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.27’de, bunlara ilişkin grafik ise Şekil 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.27. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm^2)

Ağaç Türü	Destek Katmanı	Tutkal Çeşidi							
		Pol-D ₄				PVAc-D ₄			
		Katman Sayısı				Katman Sayısı			
		3		5		3		5	
		$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	Karbon F. K.	8423	BC	8175	CD	5423	MNO	5772	LMN
	Bambu Kap.	9096	A*	8775	AB	8866	AB	7496	EF
	Çelik Tel	7421	EFG	6385	HIJ	7609	EF	5663	LMN
	D. Katmansız	5986	JKLM	4937	OP	6356	HIJK	5486	MN
Doğu Kayını	Karbon F. K.	6535	HIJ	8346	BCD	3926	Q**	4769	P
	Bambu Kap.	7845	DE	8517	BC	6101	IJKL	8345	BCD
	Çelik Tel	6908	GH	6484	HIJ	5352	NO	5819	KLMN
	D. Katmansız	5990	JKLM	6607	HI	5484	MN	7117	FG
LSD $\pm$ 491,6									

Çizelge 5.27’ye göre, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü 3 katmanlı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan bambu kaplama destek katmanlı sarıçamda ($9096 N/mm^2$), en düşük ise 3 katmanlı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında ($3926 N/mm^2$) tespit edilmiştir.



Şekil 5.3. Eğilmede elastikiyet modülü değerleri (N/mm²)

Ayrıca, eğilmede elastikiyet modülü bakımından farklı destek katmanları ile güçlendirilerek lamine edilmiş ağaç malzemeden hazırlanan deney örnekleri ile masif olarak hazırlanan deney örneklerinin değişim yüzdeleri Çizelge 5.28’de verilmiştir.

Çizelge 5.28. Eğilmede elastikiyet modülü bakımından masife kıyasla değişim yüzdeleri (%)

Ağaç Türü	Katman Sayısı	Destek katmanı	Eğilmede Elastikiyet Modülü (N/mm ²)					
			Pol-D ₄			PVAc-D ₄		
			<i>E</i> (N/mm ²)	Masif (N/mm ²)	Değişim (%)	<i>E</i> (N/mm ²)	Masif (N/mm ²)	Değişim (%)
Sarıçam	3 Katman	Karbon Fib. K.	8343,32	5587,89	49,31	5422,79	5587,89	-2,95
		Bambu Kap.	9095,98		62,78	8865,7		58,66
		Çelik Tel	7421,42		32,81	6608,7		18,27
		D. Katmansız	5985,79		7,12	6355,77		13,74
	5 Katman	Karbon Fib. K.	8175,07		46,30	5772,24		3,30
		Bambu Kap.	8775,16		57,04	7496,29		34,15
		Çelik Tel	6383,84		14,24	5662,94		1,34
		D. Katmansız	4937,44		-11,64	5485,96		-1,82
Doğu Kayını	3 Katman	Karbon Fib. K.	6535,48	5559,73	16,96	3925,94	5559,73	-29,74
		Bambu Kap.	7844,90		40,39	6100,94		9,18
		Çelik Tel	6907,89		23,62	5351,68		-4,23
		D. Katmansız	5990,43		7,20	5484,22		-1,86
	5 Katman	Karbon Fib. K.	8345,76		49,35	4769,25		-14,65
		Bambu Kap.	8517,17		52,42	8344,56		49,33
		Çelik Tel	6484,02		16,04	5819,11		4,14
		D. Katmansız	6606,67		18,23	7177,23		28,44

Eğilme esneklik modülü bakımından masife kıyasla en yüksek yüzde değişimi 3 katmanlı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan bambu kaplama destek katmanlı sarıçamda (%62,78), en düşük yüzde değişimi ise 3 katmanlı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında (-%29,74) elde edilmiştir.

5.4. Basınç Dayanımı Sonuçları

Basınç dayanımına ilişkin istatistikî değerler Çizelge 5.29’da verilmiştir.

Çizelge 5.29. Basınç dayanımı istatistiki değerleri (N/mm²)

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi	Katman Sayısı	Destek Katmanı	Min.	Maks.	$\bar{x}$	v
Sarıçam	Pol-D ₄	3	Karbon fiber k.	43,453	57,924	53,660	9,69
			Bambu kap.	43,780	54,509	52,000	7,50
			Çelik tel	42,868	51,708	47,168	7,00
			D. katmansız	45,237	51,769	48,898	4,50
		5	Karbon fiber k.	50,031	62,732	57,154	7,35
			Bambu kap.	40,429	48,048	45,042	5,77
			Çelik tel	42,189	46,988	44,671	4,25
			D. katmansız	42,546	47,426	45,290	3,75
	PVAc-D ₄	3	Karbon fiber k.	38,493	48,850	45,456	7,48
			Bambu kap.	35,482	47,732	42,655	8,44
			Çelik tel	42,177	50,115	46,389	5,39
			D. katmansız	38,072	46,734	42,505	7,29
		5	Karbon fiber k.	39,833	48,903	45,699	7,22
			Bambu kap.	37,311	45,335	40,844	6,37
			Çelik tel	39,718	48,292	43,872	7,29
			D. katmansız	38,020	47,664	44,490	7,42
Doğu kayını	Pol-D ₄	3	Karbon fiber k.	53,422	59,431	56,995	3,33
			Bambu kap.	44,423	54,396	49,743	5,63
			Çelik tel	48,292	55,726	52,201	4,60
			D. katmansız	46,069	51,131	48,484	3,09
		5	Karbon fiber k.	61,219	64,213	62,764	1,59
			Bambu kap.	42,584	48,625	47,104	3,61
			Çelik tel	51,884	55,726	53,209	2,07
			D. katmansız	47,107	52,735	49,615	3,22
	PVAc-D ₄	3	Karbon fiber k.	48,756	54,218	52,204	3,83
			Bambu kap.	42,891	49,255	45,796	4,80
			Çelik tel	48,530	53,593	51,344	2,92
			D. katmansız	51,721	55,811	52,809	2,27
		5	Karbon fiber k.	41,576	48,040	45,558	4,61
			Bambu kap.	42,338	48,642	45,482	4,18
			Çelik tel	46,505	51,575	49,489	3,64
			D. katmansız	49,149	54,097	52,328	2,68

Çizelge 5.29'a göre, basınç dayanımı aritmetik ortalama değerleri; ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı deney örnekleri arasında farklı bulunmuştur.

Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin basınç dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Basınç dayanımı değeri; karbon fiber kumaşa 53,660 N/mm², bambu kaplamada 52,000 N/mm², çelik tel örgüde 47,168 N/mm² ve destek katmansızda 48,898 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı sarıçam örneklerde ise; karbon fiber kumaşa 57,154 N/mm², bambu kaplamada 45,042 N/mm², çelik tel örgüde 44,671 N/mm² ve destek katmansızda 45,290 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

PVAc–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin basınç dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Basınç dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 45,456 N/mm², bambu kaplamada 42,655 N/mm², çelik telde 46,389 N/mm² ve destek katmansızda 42,505 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı sarıçam örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 45,699 N/mm², bambu kaplamada 40,844 N/mm², çelik tel örgüde 44,490 N/mm² ve destek katmansızda 93,8 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

Pol–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin basınç dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Basınç dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 56,995 N/mm², bambu kaplamada 49,743 N/mm², çelik tel örgüde 52,201 N/mm² ve destek katmansızda 48,484 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 62,764 N/mm², bambu kaplamada 47,104 N/mm², çelik tel örgüde 53,209 N/mm² ve destek katmansızda 49,615 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

PVAc–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin basınç dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Basınç dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 52,204 N/mm², bambu kaplamada 45,796 N/mm², çelik tel örgüde 51,344 N/mm² ve destek katmansızda 52,809 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 45,558 N/mm², bambu kaplamada 45,482 N/mm², çelik tel örgüde 49,489 N/mm² ve destek katmansızda 52,328 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

Ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı ile bu bağımsız değişkenlerin ikili, üçlü ve dördümlü etkileşimlerinin basınç dayanımı üzerindeki etkilerine ilişkin çoklu varyans analizi sonuçları Çizelge 5.30'da verilmiştir.

Çizelge 5.30. Basınç dayanımına ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanının etkisine ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P≤0,05
Ağaç Türü (A)	1	1504,969	1504,969	218,0680	0,0000*
Tutkal Çeşidi (B)	1	1402,071	1402,071	203,1582	0,0000*
Etkileşim (AB)	1	86,739	86,739	12,5684	0,0005*
Katman Sayısı (C)	1	77,424	77,424	11,2186	0,0009*
Etkileşim (AC)	1	18,318	18,318	2,6543	0,1044*
Etkileşim (BC)	1	16,191	16,191	2,3460	0,1267*
Etkileşim (ABC)	1	151,901	151,901	22,0103	0,0000*
Destek katmanı (D)	3	1692,869	564,290	81,7648	0,0000*
Etkileşim (AD)	3	207,253	69,084	10,0102	0,0000*
Etkileşim (BD)	3	1265,793	421,931	61,1372	0,0000*
Etkileşim (ABD)	3	259,652	86,551	12,5411	0,0000*
Etkileşim (CD)	3	148,612	49,537	7,1779	0,0001*
Etkileşim (ACD)	3	80,165	26,722	3,8720	0,0097*
Etkileşim (BCD)	3	392,382	130,794	18,9519	0,0000*
Etkileşim (ABCD)	3	37,630	12,543	18,9519	0,1441*
Hata	288	1987,596	6,901		
Toplam	319	9329,568			

Varyans kaynaklarının basınç dayanımı etkileri bakımından gruplar arası farklılık ağaç türü, tutkal çeşidi, ağaç türü-tutkal çeşidi ikili etkileşimi, katman sayısı, ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı üçlü etkileşimi, destek katmanı, ağaç türü-destek katmanı ikili etkileşimi, tutkal çeşidi-destek katmanı ikili etkileşimi, katman sayısı-destek katmanı ikili etkileşimi ve ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı üçlü etkileşimi düzeyinde istatistiki anlamda önemli bulunmuştur ($\alpha \leq 0,05$).

Varyans kaynaklarından ağaç türü-katman sayısı ikili etkileşimi, tutkal çeşidi-katman sayısı ikili etkileşimi, ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı dördü etkileşimi farklı destek katmanları ile güçlendirilerek lamine edilmiş ağaç malzemenin basınç dayanımı üzerinde etkili olmadığı görülmektedir.

3 ve üzeri değişken içeren faktörlerin başarı sıralamaları Duncan testi ile yapılmış, 2 değişkenli faktörler ise aritmetik ortalamalara göre değerlendirilmiştir.

Ağaç türü düzeyinde, en yüksek basınç dayanımı Doğu kayınında ($50,94 \text{ N/mm}^2$), en düşük ise sarıçamda ($46,61 \text{ N/mm}^2$) tespit edilmiştir. Tutkal çeşidi düzeyinde, en yüksek basınç

dayanımı Pol-D₄ tutkalında (50,87 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ (46,68 N/mm²) tespit edilmiştir. Katman düzeyinde ise en yüksek basınç dayanımı 3 katmanlı örneklerde (49,27 N/mm²), en düşük ise 5 katmanlı örneklerde (48,28 N/mm²) tespit edilmiştir.

Ağaç türü-tutkal çeşidi ikili etkileşiminde elde edilen basınç dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi sonuçları Çizelge 5.31’de verilmiştir.

Çizelge 5.31. Ağaç türü-tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	49,22	B	43,99	C**
Doğu kayını	52,52	A*	49,37	B
LSD $\pm$ 0,8172				

$\bar{x}$: Aritmetik ort. HG: Homojenlik grubu *: En yüksek basınç dayanımı **: En düşük basınç dayanımı

Çizelge 5.31’e göre, en yüksek basınç dayanımı Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan Doğu kayınında (52,52 N/mm²) elde edilmiş, bunu sırasıyla PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan Doğu kayını (49,37 N/mm²), Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan sarıçam (49,22 N/mm²) ve PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan sarıçam (43,99 N/mm²) örnekler takip etmiştir.

Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı üçlü etkileşiminde elde edilen basınç dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.32’de verilmiştir.

Çizelge 5.32. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Tutkal Çeşidi	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Katman Sayısı				Katman Sayısı			
	3		5		3		5	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Pol-D ₄	50,42	C	48,03	D	51,86	B	50,54	C
PVAc-D ₄	44,26	D	43,73	E**	53,18	A*	48,21	D
LSD $\pm$ 1,156								

Çizelge 5.32’ye göre, en yüksek basınç dayanımı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayınında (53,18 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 5 katmanlı

sarıçamda ($43,73 \text{ N/mm}^2$) tespit edilmiştir. Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan; 3 katmanlı sarıçam örnekler ile 5 katmanlı Doğu kayını örnekler arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Destek katmanı düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.33’de verilmiştir.

Çizelge 5.33. Destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm^2)

Destek Katmanı							
Karbon Fiber K.		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
52,43	A*	46,09	C**	48,54	B	48,04	B
LSD $\pm 0,8172$							

Çizelge 5.33’e göre, en yüksek basınç dayanımı karbon fiber kumaşa ($52,43 \text{ N/mm}^2$), en düşük ise bambu kaplamada ($46,09 \text{ N/mm}^2$) elde edilmiştir. Çelik tel ($48,54 \text{ N/mm}^2$) ile destek katmansız ($48,04 \text{ N/mm}^2$) arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen basınç dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.34. Ağaç türü-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm^2)

Ağaç Türü	Destek Katmanı							
	K. Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	50,48	B	45,14	D**	45,52	D	45,29	D
Doğu kayını	54,38	A*	47,04	B	51,56	B	50,80	B
LSD $\pm 1,156$								

Çizelge 5.34’e göre, en yüksek basınç dayanımı karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında ($54,38 \text{ N/mm}^2$), en düşük ise bambu kaplama destek katmanlı sarıçamda ($45,14 \text{ N/mm}^2$) tespit edilmiştir.

Tutkal çeşidi-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen basınç dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.35’de verilmiştir.

Çizelge 5.35. Tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Tutkal Çeşidi	Destek Katmanı							
	Karbon Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Pol-D ₄	57,63	A*	48,48	BC	49,31	B	48,06	C
PVAc-D ₄	47,23	C	43,69	D**	47,77	C	48,03	C
LSD $\pm$ 1,156								

Çizelge 5.35’e göre, en yüksek basınç dayanımı, Pol-D₄ karbon fiber kumaş destek katmanlıda (57,63 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ bambu kaplama destek katmanlıda (43,69 N/mm²) tespit edilmiştir. Destek katmansız; Pol-D₄ ile PVAc-D₄ arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı üçlü etkileşiminde elde edilen basınç dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.36’da verilmiştir.

Çizelge 5.36. Ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Destek Katmanı	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Tutkal Çeşidi				Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄		Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Karbon Fib. K.	55,38	B	45,58	GH	59,88	A*	48,88	DE
Bambu Kap.	48,52	EF	41,75	J**	48,44	EF	45,64	GH
Çelik Tel	45,92	GH	45,13	HI	52,70	C	50,42	D
D. Katmansız	47,07	FG	43,52	I	49,04	DE	52,55	C
LSD $\pm$ 1,634								

Çizelge 5.36’ya göre, en yüksek basınç dayanımı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında (59,88 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan bambu kaplama destek katmanlı sarıçamda (41,75 N/mm²) tespit edilmiştir.

Katman sayısı-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen basınç dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.37’de verilmiştir.

Çizelge 5.37. Katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Katman Sayısı	Destek Katmanı							
	Karbon Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	52,06	A	47,55	C	49,28	B	48,18	BC
5	52,79	A*	44,63	D**	47,81	C	47,91	C
LSD $\pm$ 1,156								

Çizelge 5.37’ye göre, en yüksek basınç dayanımı 5 katmanlı karbon fiber kumaş destek katmanlıda (52,79 N/mm²), en düşük ise 5 katmanlı bambu kaplama destek katmanlıda (44,63 N/mm²) tespit edilmiştir. Karbon fiber kumaş destek katmanlı; 3 ve 5 katmanlı örnekler arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı üçlü etkileşiminde elde edilen basınç dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.38’de verilmiştir.

Çizelge 5.38. Ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Destek Katmanı	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Katman Sayısı				Katman Sayısı			
	3		5		3		5	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Karbon F. K.	49,53	C	51,43	B	54,60	A*	54,16	A
Bambu Kap.	47,33	DE	42,94	H**	47,77	D	46,31	DEF
Çelik Tel	46,78	DE	44,27	GH	51,77	B	51,35	B
D. Katmansız	45,72	EFG	44,86	FG	50,65	BC	50,95	BC
LSD $\pm$ 1,634								

Çizelge 5.38’e göre, en yüksek basınç dayanımı 3 katmanlı, karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında (54,60 N/mm²), en düşük ise 5 katmanlı bambu kaplama destek katmanlı sarıçamda (42,94 N/mm²) tespit edilmiştir.

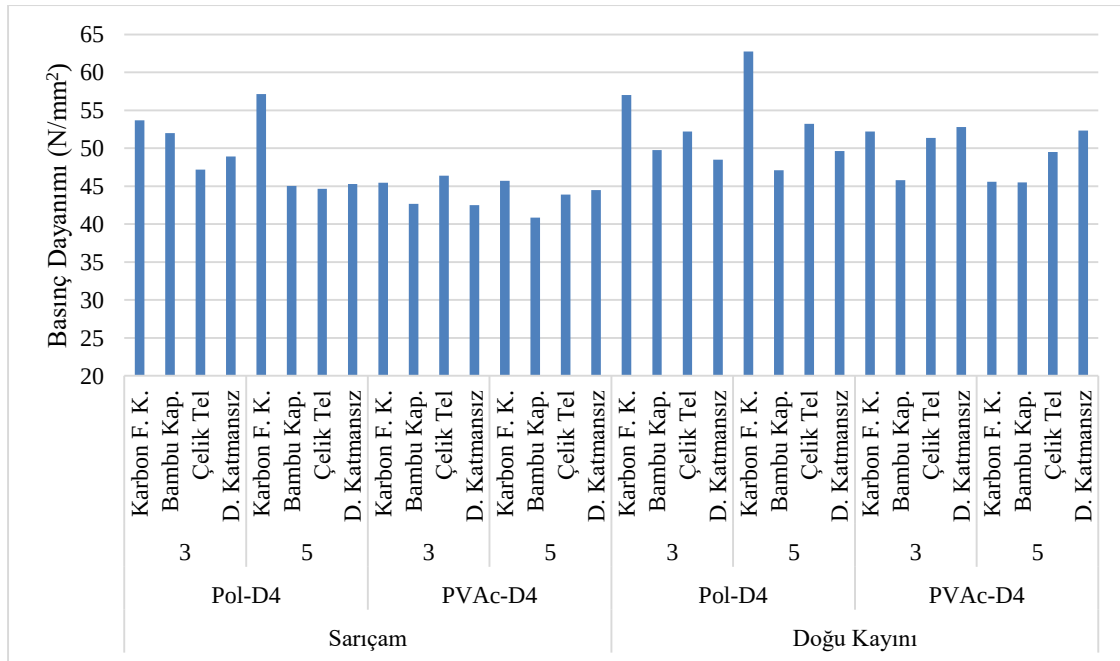
Tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı üçlü etkileşiminde elde edilen basınç dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.39’da verilmiştir.

Çizelge 5.39. Tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm^2)

Destek Katmanı	Tutkal Çeşidi							
	Pol-D ₄				PVAc-D ₄			
	Katman Sayısı				Katman Sayısı			
	3		5		3		5	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Karbon F. K.	55,30	B	59,96	A*	48,83	DE	45,63	HI
Bambu Kap.	50,87	C	46,09	GH	44,23	IJ	43,16	J**
Çelik Tel	49,68	CD	49,94	DE	48,87	DE	46,68	FGH
D. Katmansız	48,69	DE	47,42	EFG	47,68	EFG	48,39	DEF
LSD $\pm 1,634$								

Çizelge 5.39’a göre, en yüksek basınç dayanımı 5 katmanlı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlıda ($59,96 N/mm^2$), en düşük ise 5 katmanlı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan bambu kaplama destek katmanlıda ($43,16 N/mm^2$) tespit edilmiştir.

Tüm değişkenleri kapsayan aritmetik ortalamalar esas alınarak oluşturulan grafik, Şekil 5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.4. Basınç dayanımı değerleri (N/mm^2)

Ayrıca, basınç dayanımı bakımından farklı destek katmanları ile güçlendirilerek laminate edilmiş ağaç malzemeden hazırlanan deney örnekleri ile masif olarak hazırlanan deney örneklerinin değişim yüzdeleri Çizelge 5.40’da verilmiştir.

Çizelge 5.40. Basınç dayanımı bakımından masife kıyasla değişim yüzdeleri (%)

Ağaç Türü	Katman Sayısı	Destek Katmanı	Basınç Dayanımı (N/mm ²)					
			Pol-D ₄			PVAc-D ₄		
			$f_{c,0}$ (N/mm ²)	Masif (N/mm ²)	Değişim (%)	$f_{c,0}$ (N/mm ²)	Masif (N/mm ²)	Değişim (%)
Sarıçam	3 Katman	Karbon Fib. K.	53,66	42,37	26,65	45,46	42,37	7,29
		Bambu Kap.	52,00		22,73	42,65		0,66
		Çelik Tel	47,17		11,33	46,39		9,5
		D. Katmansız	48,90		15,41	42,5		0,31
	5 Katman	Karbon Fib. K.	57,15		34,88	45,70		7,86
		Bambu Kap.	45,04		6,30	40,84		-3,61
		Çelik Tel	44,67		5,43	43,87		3,54
		D. Katmansız	45,29		6,89	44,49		5,00
Doğu Kayını	3 Katman	Karbon Fib. K.	56,99	46,45	22,69	52,20	46,45	12,38
		Bambu Kap.	49,74		7,08	45,80		-1,40
		Çelik Tel	52,20		12,38	51,34		10,53
		D. Katmansız	48,48		4,37	52,81		13,69
	5 Katman	Karbon Fib. K.	62,76		35,11	45,56		-1,92
		Bambu Kap.	47,10		1,40	45,48		-2,09
		Çelik Tel	53,21		14,55	49,49		6,54
		D. Katmansız	49,61		6,80	52,33		12,66

Basınç dayanımı bakımından masife kıyasla en yüksek yüzde değişimi 5 katmanlı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan bambu kaplama destek katmanlı Doğu kayınında (%35,11), en düşük yüzde değişimi ise 5 katmanlı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlı sarıçamda (-%3,61) elde edilmiştir.

5.5. Dinamik Eğilme Dayanımı Sonuçları

Dinamik eğilme dayanımına ilişkin istatistikî değerler Çizelge 5.41’da verilmiştir.

Çizelge 5.41. Dinamik eğilme dayanımı istatistikî değerleri (kj/m²)

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi	Katman Sayısı	Destek Katmanı	Min.	Maks.	$\bar{x}$	v
Sarıçam	Pol-D ₄	3	Karbon fiber k.	78,502	86,623	82,710	4,23
			Bambu kap.	65,847	77,512	70,959	5,36
			Çelik tel	81,465	93,348	85,847	5,82
			D. katmansız	58,059	67,470	62,934	5,40
		5	Karbon fiber k.	57,056	67,800	62,320	6,90
			Bambu kap.	74,227	83,250	79,537	4,40
			Çelik tel	53,270	64,773	60,776	7,73
			D. katmansız	48,417	61,694	54,170	8,68
	PVAc-D ₄	3	Karbon fiber k.	105,397	112,005	108,941	2,75
			Bambu kap.	58,726	66,900	64,315	4,51
			Çelik tel	65,381	73,337	69,392	4,76
			D. katmansız	68,806	78,900	74,921	5,34
		5	Karbon fiber k.	99,964	111,802	106,452	4,32
			Bambu kap.	68,524	78,884	73,516	6,12
			Çelik tel	51,661	60,509	56,869	5,98
			D. katmansız	51,060	62,707	55,856	7,52
Doğu kayını	Pol-D ₄	3	Karbon fiber k.	71,675	79,370	76,330	3,93
			Bambu kap.	100,718	111,918	107,546	4,56
			Çelik tel	73,381	84,165	78,885	5,70
			D. katmansız	66,615	70,326	68,892	2,47
		5	Karbon fiber k.	92,064	98,338	94,743	2,64
			Bambu kap.	94,068	103,202	97,305	3,60
			Çelik tel	75,795	84,759	79,698	4,27
			D. katmansız	66,749	73,536	69,035	3,77
	PVAc-D ₄	3	Karbon fiber k.	74,537	82,777	78,292	3,96
			Bambu kap.	68,255	74,798	72,464	3,31
			Çelik tel	62,447	72,131	68,461	5,26
			D. katmansız	60,225	68,054	64,540	4,65
		5	Karbon fiber k.	108,570	111,904	110,812	1,44
			Bambu kap.	85,554	94,014	90,041	3,22
			Çelik tel	67,542	72,578	70,309	2,84
			D. katmansız	68,871	76,301	71,371	3,64

Çizelge 5.41'e göre, dinamik eğilme dayanımı aritmetik ortalama değerleri; ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı deney örnekleri arasında farklı bulunmuştur.

Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin dinamik eğilme dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Dinamik eğilme dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 82,710 kj/m², bambu kaplamada 70,959 kj/m², çelik tel örgüde 85,847 kj/m² ve destek katmansızda 62,934 kj/m² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı sarıçam örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 62,320 kj/m², bambu kaplamada 79,357 kj/m², çelik tel örgüde 60,776 kj/m² ve destek katmansızda 54,170 kj/m² olarak tespit edilmiştir.

PVAc–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin dinamik eğilme dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Dinamik eğilme dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 108,941 kJ/m², bambu kaplamada 64,315 kJ/m², çelik tel örgüde 69,392 kJ/m² ve destek katmansızda 74,921 kJ/m² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı sarıçam örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 106,452 kJ/m², bambu kaplamada 73,516 kJ/m², çelik tel örgüde 56,869 kJ/m² ve destek katmansızda 55,856 kJ/m² olarak tespit edilmiştir.

Pol–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin dinamik eğilme dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Dinamik eğilme dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 76,330 kJ/m², bambu kaplamada 107,546 kJ/m², çelik tel örgüde 78,885 kJ/m² ve destek katmansızda 68,892 kJ/m² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 94,743 kJ/m², bambu kaplamada 97,305 kJ/m², çelik tel örgüde 79,698 kJ/m² ve destek katmansızda 69,035 kJ/m² olarak tespit edilmiştir.

PVAc–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin dinamik eğilme dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Dinamik eğilme dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 78,292 kJ/m², bambu kaplamada 72,464 kJ/m², çelik telde 68,461 kJ/m² ve destek katmansızda 64,540 kJ/m² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 110,812 kJ/m², bambu kaplamada 90,041 kJ/m², çelik tel örgüde 70,309 kJ/m² ve destek katmansızda 71,371 kJ/m² olarak tespit edilmiştir.

Ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı ile bu bağımsız değişkenlerin ikili, üçlü ve dörtlü etkileşimlerinin dinamik eğilme dayanımı üzerindeki etkilerine ilişkin çoklu varyans analizi sonuçları Çizelge 5.42’de verilmiştir.

Çizelge 5.42. Dinamik eğilme dayanımına ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanının etkisine ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P≤0,05
Ağaç Türü (A)	1	3166,246	3166,246	250,5817	0,0000*
Tutkal Çeşidi (B)	1	3,190	0,2525	0,2525	NS*
Etkileşim (AB)	1	1790,281	1790,281	141,6857	0,0000*
Katman Sayısı (C)	1	0,794	0,794	0,0628	NS*
Etkileşim (AC)	1	3631,383	3631,383	287,3934	0,0000*
Etkileşim (BC)	1	910,327	910,327	72,0447	0,0000*
Etkileşim (ABC)	1	150,351	150,351	11,8990	0,0007*
Destek katmanı (D)	3	17570,442	5856,814	463,5175	0,0000*
Etkileşim (AD)	3	2507,217	835,739	66,1417	0,0000*
Etkileşim (BD)	3	9485,960	3161,987	250,2446	0,0000*
Etkileşim (ABD)	3	1105,029	368,343	29,1512	0,0000*
Etkileşim (CD)	3	2266,853	755,618	59,8008	0,0000*
Etkileşim (ACD)	3	2698,556	899,519	71,1893	0,0000*
Etkileşim (BCD)	3	596,067	198,689	15,7246	0,0000*
Etkileşim (ABCD)	3	746,271	248,757	19,6870	0,0000*
Hata	160	2021,693	12,636		
Toplam	191	48650,660			

Varyans kaynaklarının dinamik eğilme dayanımına etkileri bakımından gruplar arası farklılık ağaç türü, ağaç türü-tutkal çeşidi ikili etkileşimi, ağaç türü-katman sayısı ikili etkileşimi, tutkal çeşidi-katman sayısı ikili etkileşimi, ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı üçlü etkileşimi, destek katmanı, ağaç türü-destek katmanı ikili etkileşimi, tutkal çeşidi-destek katmanı ikili etkileşimi, ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı üçlü etkileşimi, katman sayısı-destek katmanı ikili etkileşimi, ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı üçlü etkileşimi ve ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı dördü etkileşimi düzeyinde istatistiki anlamda önemlidir ($\alpha \leq 0,05$).

Varyans kaynaklarından tutkal çeşidi ve katman sayısının dinamik eğilme dayanımı üzerinde etkili olmadığı görülmektedir.

3 ve üzeri değişken içeren faktörlerin başarı sıralamaları Duncan testi ile yapılmış, 2 değişkenli faktörler ise aritmetik ortalamalara göre değerlendirilmiştir.

Ağaç türü düzeyinde, en yüksek dinamik eğilme dayanımı Doğu kayınında (81,21 kJ/m²), en düşük ise sarıçamda (73,09) tespit edilmiştir.

Ağaç türü-tutkal çeşidi ikili etkileşiminde elde edilen dinamik eğilme dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.43'te verilmiştir.

Çizelge 5.43. Ağaç türü-tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi (kj/m²)

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	69,91	D**	76,27	C
D. Kayını	84,14	A*	78,29	B
LSD $\pm$ 1,431				

$\bar{x}$: Aritmetik ort. HG: Homojenlik grubu *: En yüksek d. eğilme dayanımı **: En düşük d. eğilme dayanımı

Çizelge 5.43'e göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan Doğu kayınında (84,14 kj/m²) elde edilmiş, bunu sırasıyla PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan Doğu kayını (78,29 kj/m²), PVAc-D₄ tutkalı ile yapıştırılan sarıçam (76,27 kj/m²) ve Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan sarıçam (69,91 kj/m) örnekler takip etmiştir.

Ağaç türü-katman sayısı ikili etkileşiminde elde edilen dinamik eğilme dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.44'te verilmiştir.

Çizelge 5.44. Ağaç türü-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (kj/m²)

Katman Sayısı	Ağaç Türü			
	Sarıçam		Doğu Kayını	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	77,50	B	68,68	C**
5	76,93	B	85,50	A*
LSD $\pm$ 1,431				

Çizelge 5.44'e göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı 5 katmanlı Doğu kayınında (85,50 kj/m²) elde edilmiş, bunu sırasıyla 3 katmanlı sarıçam (77,50 kj/m²), 5 katmanlı sarıçam (76,93 kj/m²) ve 5 katmanlı sarıçam (68,68 kj/m²) örnekler takip etmiştir.

Tutkal çeşidi-katman sayısı ikili etkileşiminde elde edilen dinamik eğilme dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.45'te verilmiştir.

Çizelge 5.45. Tutkal çeşidi-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (kJ/m²)

Katman Sayısı	Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	79,26	A	74,78	B**
5	75,17	B	79,39	A*
LSD $\pm$ 1,431				

Çizelge 5.45'e göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 5 katmanlı örneklerde (79,39 kJ/m²), en düşük ise PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı örneklerde (74,78 kJ/m²) tespit edilmiştir.

Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı üçlü etkileşiminde elde edilen dinamik eğilme dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.46'da verilmiştir.

Çizelge 5.46. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (kJ/m²)

Tutkal Çeşidi	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Katman Sayısı				Katman Sayısı			
	3		5		3		5	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Pol-D ₄	75,61	D	64,20	G**	82,91	B	85,36	A
PVAc-D ₄	79,39	C	73,15	E	70,94	F	85,63	A*
LSD $\pm$ 2,024								

Çizelge 5.46'ya göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 5 katmanlı Doğu kayınında (85,63 kJ/m²), en düşük ise Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 5 katmanlı sarıçamda (64,20 kJ/m²) tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayınında; PVAc-D₄ ile Pol-D₄ tutkal yapıştırılan örnekler arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Destek katmanı düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.47'de verilmiştir.

Çizelge 5.47. Destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kj/m²)

Destek Katmanı							
Karbon Fiber K.		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
90,07	A*	81,95	B	71,36	C	65,21	D**
LSD $\pm$ 1,431							

Çizelge 5.47'ye göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı karbon fiber kumaşta (90,07 kj/m²) en düşük değer ise destek katmansızda (65,21 kj/m²) elde edilmiştir.

Ağaç türü-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen dinamik eğilme dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.48'de verilmiştir.

Çizelge 5.48. Ağaç türü-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kj/m²)

Ağaç Türü	Destek Katmanı							
	K. Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	90,11	A	72,06	C	68,22	D	61,97	E**
Doğu kayını	90,04	A	91,84	A*	74,50	B	68,46	D
LSD $\pm$ 2,024								

Çizelge 5.48'e göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı bambu kaplama destek katmanlı Doğu kayınında (91,84 kj/m²), en düşük ise destek katmansız sarıçamda (61,97 kj/m²) tespit edilmiştir. Çelik tel destek katmanlı sarıçam ile destek katmansız Doğu kayını örnekler arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Tutkal çeşidi-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen dinamik eğilme dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.49'da verilmiştir.

Çizelge 5.49. Tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kj/m²)

Tutkal Çeşidi	Destek Katmanı							
	Karbon Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Pol-D ₄	79,03	C	88,84	B	76,46	D	63,76	F**
PVAc-D ₄	101,10	A*	75,06	D	66,26	E	66,67	E
LSD $\pm$ 2,024								

Çizelge 5.49'a göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı; PVAc-D₄ karbon fiber kumaş destek katmanlıda (101,10 kj/m²), en düşük ise Pol-D₄ destek katmansızda (63,76 kj/m²) tespit edilmiştir. PVAc-D₄; çelik tel destek katmanlı ile destek katmansız arasındaki fark ve Pol-D₄ çelik tel destek katmanlı ile PVAc-D₄ bambu kaplama destek katmanlı örnekler arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı üçlü etkileşiminde elde edilen dinamik eğilme dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.50'de verilmiştir.

Çizelge 5.50. Ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kj/m²)

Destek Katmanı	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Tutkal Çeşidi				Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄		Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Karbon Fib. K.	72,51	F	107,7	A*	85,54	D	94,55	C
Bambu Kap.	75,25	F	68,87	G	102,40	B	81,25	E
Çelik Tel	73,31	F	63,13	I	79,62	E	69,38	G
D. Katmansız	58,55	J**	65,39	HI	68,96	G	67,96	GH
LSD $\pm$ 2,862								

Çizelge 5.50'ye göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlı sarıçamda (107,7 kj/m²), en düşük ise Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan destek katmansız sarıçamda (58,55 kj/m²) tespit edilmiştir.

Katman sayısı-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen dinamik eğilme dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.51'de verilmiştir.

Çizelge 5.51. Katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kj/m²)

Katman Sayısı	Destek Katmanı							
	Karbon Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	86,57	B	78,82	C	75,65	D	67,82	E
5	93,58	A*	85,08	B	67,08	E	62,61	F**
LSD $\pm$ 2,024								

Çizelge 5.51'e göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı 5 katmanlı karbon fiber kumaş destek katmanlıda (93,58 kj/m²), en düşük ise 5 destek katmansızda (62,61 kj/m²) tespit edilmiştir. 5 katmanlı bambu kaplama destek katmanlı ile 3 katmanlı karbon fiber kumaş destek katmanlı ve 5 katmanlı çelik tel destek katmanlı ile 3 katmanlı destek katmansız örnekler arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı üçlü etkileşiminde elde edilen dinamik eğilme dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.52'de verilmiştir.

Çizelge 5.52. Ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kj/m²)

Destek Katmanı	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Katman Sayısı				Katman Sayısı			
	3		5		3		5	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Karbon F. K.	95,83	B	84,39	D	77,31	E	102,8	A*
Bambu Kap.	67,64	GH	76,48	EF	90,01	C	93,67	B
Çelik Tel	77,62	E	58,82	I	73,67	F	75,33	EF
D. Katmansız	68,93	GH	55,01	J**	66,72	H	70,20	G
LSD $\pm$ 2,862								

Çizelge 5.52'ye göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı 5 katmanlı, karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında (102,8 kj/m²), en düşük ise 5 katmanlı destek katmansız sarıçamda (55,01 kj/m²) tespit edilmiştir.

Tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı üçlü etkileşiminde elde edilen dinamik eğilme dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.53'te verilmiştir.

Çizelge 5.53. Tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kj/m²)

Destek Katmanı	Tutkal Çeşidi							
	Pol-D ₄				PVAc-D ₄			
	Katman Sayısı				Katman Sayısı			
	3		5		3		5	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Karbon F. K.	79,52	DE	78,53	E	93,62	B	108,6	A*
Bambu Kap.	89,25	C	88,42	C	68,39	FG	81,73	D
Çelik Tel	82,37	D	70,56	F	68,93	FG	63,59	HI
D. Katmansız	65,91	GH	61,60	I**	69,73	F	63,61	HI
LSD $\pm$ 2,862								

Çizelge 5.53'e göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı 5 katmanlı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlıda (108,6 kj/m²), en düşük ise 5 katmanlı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan destek katmansızda (61,60 kj/m²) tespit edilmiştir.

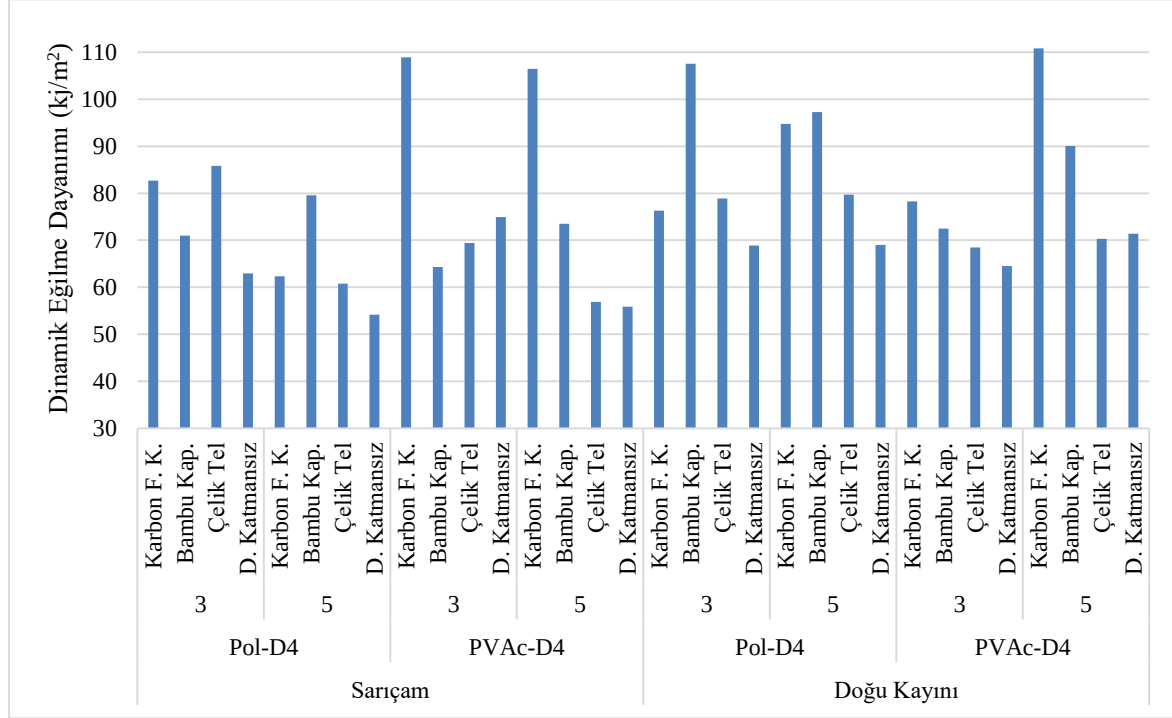
Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı dörtlü etkileşiminde elde edilen dinamik eğilme dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.53'de, bunlara ilişkin grafik ise Şekil 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.54. Ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (kj/m²)

Ağaç Türü	Destek Katmanı	Tutkal Çeşidi							
		Pol-D ₄				PVAc-D ₄			
		Katman Sayısı				Katman Sayısı			
		3		5		3		5	
		$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	Karbon F. K.	82,71	DE	62,32	M	108,90	A	106,5	A
	Bambu Kap.	70,96	IJK	79,54	EF	64,32	LM	73,43	HIJ
	Çelik Tel	85,85	D	60,78	MN	69,39	JK	56,87	NO
	D. Katmansız	62,93	M	54,17	O**	74,92	GHI	55,86	O
Doğu Kayını	Karbon F. K.	76,33	FGH	94,74	B	78,29	EFG	110,8	A*
	Bambu Kap.	107,50	A	97,31	B	72,46	HIJK	90,04	C
	Çelik Tel	78,88	EFG	80,35	EF	68,46	KL	70,31	JK
	D. Katmansız	68,89	JK	69,03	JK	64,54	LM	71,37	IJK
LSD $\pm$ 4,048									

Çizelge 5.54'e göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı 5 katmanlı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında (110,8 kj/m²), en düşük ise

5 katmanlı Pol-D4 tutkal ile yapıştırılan destek katmansız sarıçamda ($54,17 \text{ kJ/m}^2$) tespit edilmiştir.



Şekil 5.5. Dinamik eğilme dayanımı değerleri (kJ/m^2)

Ayrıca, dinamik eğilme dayanımı bakımından farklı destek katmanları ile güçlendirilerek lamine edilmiş ağaç malzemedan hazırlanan deney örnekleri ile masif olarak hazırlanan deney örneklerinin değişim yüzdeleri Çizelge 5.55'te verilmiştir.

Çizelge 5.55. Dinamik eğilme dayanımı bakımından masife kıyasla değişim yüzdeleri (%)

Ağaç Türü	Katman Sayısı	Destek katmanı	Dinamik Eğilme Dayanımı (kJ/m ²)					
			Pol-D ₄			PVAc-D ₄		
			σ_{DE} (kJ/m ²)	Masif (kJ/m ²)	Değişim (%)	σ_{DE} (kJ/m ²)	Masif (kJ/m ²)	Değişim (%)
Sarıçam	3 Katman	Karbon Fib. K.	82,71	46,09	79,4	108,94	46,09	136,4
		Bambu Kap.	70,96		54,0	64,31		39,5
		Çelik Tel	85,85		86,3	69,39		50,5
		D. Katmansız	62,93		36,5	74,92		62,5
	5 Katman	Karbon Fib. K.	62,32		35,2	106,45		131,0
		Bambu Kap.	79,54		72,6	73,52		59,5
		Çelik Tel	60,78		31,9	56,87		23,4
		D. Katmansız	54,17		17,5	55,86		21,2
Doğu Kayını	3 Katman	Karbon Fib. K.	76,33	55,00	38,8	78,29	55,00	42,3
		Bambu Kap.	107,55		95,5	72,46		31,7
		Çelik Tel	78,88		43,4	68,46		24,5
		D. Katmansız	68,89		25,2	64,54		17,3
	5 Katman	Karbon Fib. K.	94,74		72,2	110,81		101,5
		Bambu Kap.	97,30		76,9	90,04		63,7
		Çelik Tel	79,70		44,9	70,31		27,8
		D. Katmansız	69,03		25,5	71,37		29,8

Dinamik eğilme dayanımı bakımından masife kıyasla en yüksek yüzde değişimi 3 katmanlı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlı sarıçamda (%136,4), en düşük yüzde değişimi ise 3 katmanlı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan destek katmansız Doğu kayınında (%17,3) elde edilmiştir.

5.6. Makaslama Dayanımı Sonuçları

Makaslama dayanımına ilişkin istatistikî değerler Çizelge 5.56'da verilmiştir.

Çizelge 5.56. Makaslama dayanımı istatistiki değerleri (N/mm²)

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi	Katman Sayısı	Destek Katmanı	Min.	Maks.	$\bar{x}$	v
Sarıçam	Pol-D ₄	3	Karbon F. K.	8,845	10,843	9,875	6,08
			Bambu Kap.	8,655	10,973	10,019	6,99
			Çelik Tel	8,780	11,443	10,206	8,82
			D. Katmansız	8,151	9,968	9,051	5,52
		5	Karbon F. K.	10,631	12,900	11,716	6,83
			Bambu Kap.	10,299	13,066	11,995	7,50
			Çelik Tel	9,945	12,832	11,419	8,76
			D. Katmansız	9,413	11,193	10,192	5,89
	PVAc-D ₄	3	Karbon F. K.	3,910	4,582	4,248	4,71
			Bambu Kap.	7,738	10,486	9,206	8,69
			Çelik Tel	7,054	8,464	7,505	6,66
			D. Katmansız	9,227	11,300	10,275	6,81
		5	Karbon F. K.	3,843	4,900	4,341	6,91
			Bambu Kap.	9,556	11,343	10,634	6,58
			Çelik Tel	7,031	8,734	7,907	8,85
			D. Katmansız	8,386	10,270	9,266	7,55
Doğu Kayını	Pol-D ₄	3	Karbon F. K.	9,132	12,904	11,219	9,80
			Bambu Kap.	7,033	10,485	8,661	15,01
			Çelik Tel	10,338	14,150	12,336	11,35
			D. Katmansız	9,152	10,854	9,981	6,01
		5	Karbon F. K.	8,859	12,743	11,345	10,58
			Bambu Kap.	7,790	11,345	9,766	11,26
			Çelik Tel	10,525	13,148	11,648	8,59
			D. Katmansız	9,089	12,566	10,678	11,24
	PVAc-D ₄	3	Karbon F. K.	2,035	4,221	3,313	21,13
			Bambu Kap.	8,970	10,995	9,861	7,10
			Çelik Tel	3,497	6,454	4,845	20,64
			D. Katmansız	10,064	12,924	11,565	9,51
		5	Karbon F. K.	2,243	3,643	2,730	18,32
			Bambu Kap.	8,779	10,136	9,387	5,33
			Çelik Tel	3,423	8,321	5,658	24,74
			D. Katmansız	8,964	11,927	10,187	8,83

Çizelge 5.56'ya göre, makaslama dayanımı aritmetik ortalama değerleri; ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı deney örnekleri arasında farklı bulunmuştur.

Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin makaslama dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Makaslama dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 9,875 N/mm², bambu kaplamada 10,019 N/mm², çelik tel örgüde 10,206 N/mm² ve destek katmansızda 9,051 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı sarıçam örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 11,716 N/mm², bambu kaplamada 11,995 N/mm², çelik tel örgüde 11,419 N/mm² ve destek katmansızda 10,192 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

PVAc–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı sarıçam örneklerin makaslama dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Makaslama dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 4,248 N/mm², bambu kaplamada 9,206 N/mm², çelik tel örgüde 7,505 N/mm² ve destek katmansızda 10,275 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı sarıçam örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 4,341 N/mm², bambu kaplamada 10,634 N/mm², çelik tel örgüde 7,907 N/mm² ve destek katmansızda 9,266 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

Pol–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin makaslama dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Makaslama dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 11,219 N/mm², bambu kaplamada 8,661 N/mm², çelik tel örgüde 12,336 N/mm² ve destek katmansızda 9,981 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 11,345 N/mm², bambu kaplamada 9,766 N/mm², çelik tel örgüde 11,648 N/mm² ve destek katmansızda 10,678 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

PVAc–D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 katmanlı Doğu kayını örneklerin makaslama dayanımı değerleri, kullanılan destek katmanlılarına göre farklı çıkmıştır. Makaslama dayanımı değeri; karbon fiber kumaşta 3,313 N/mm², bambu kaplamada 9,861 N/mm², çelik tel örgüde 4,845 N/mm² ve destek katmansızda 11,565 N/mm² olarak tespit edilmiştir. 5 katmanlı Doğu kayını örneklerde ise; karbon fiber kumaşta 2,730 N/mm², bambu kaplamada 9,387 N/mm², çelik tel örgüde 5,658 N/mm² ve destek katmansızda 10,187 N/mm² olarak tespit edilmiştir.

Ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı ile bu bağımsız değişkenlerin ikili, üçlü ve dörtlü etkileşimlerinin makaslama dayanımı üzerindeki etkilerine ilişkin çoklu varyans analizi sonuçları Çizelge 5.57’de verilmiştir.

Çizelge 5.57. Makaslama dayanımına ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı etkisine ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P≤0,05
Ağaç Türü (A)	1	6,828	6,828	8,7749	0,0033*
Tutkal Çeşidi (B)	1	755,944	755,944	971,4461	0,0000*
Etkileşim (AB)	1	15,279	15,279	19,6343	0,0000*
Katman Sayısı (C)	1	14,018	14,018	18,0136	0,0000*
Etkileşim (AC)	1	17,382	17,382	22,3374	0,0000*
Etkileşim (BC)	1	20,631	20,631	26,5118	0,0000*
Etkileşim (ABC)	1	1,794	1,794	2,3057	0,1300*
Destek katmanı (D)	3	392,10	130,737	168,0068	0,0000*
Etkileşim (AD)	3	42,632	14,211	18,2619	0,0000*
Etkileşim (BD)	3	823,285	274,428	352,6615	0,0000*
Etkileşim (ABD)	3	78,145	26,048	33,4741	0,0000*
Etkileşim (CD)	3	13,190	4,397	5,6500	0,0009*
Etkileşim (ACD)	3	2,938	0,979	1,2584	0,2889*
Etkileşim (BCD)	3	15,470	5,157	6,6266	0,0002*
Etkileşim (ABCD)	3	7,593	2,531	3,2524	0,0222*
Hata	288	224,111	0,778		
Toplam	319	2431,448			

Varyans kaynaklarının makaslama dayanımına etkileri bakımından gruplar arası farklılık ağaç türü, tutkal çeşidi, ağaç türü-tutkal çeşidi ikili etkileşimi, katman sayısı, ağaç türü-katman sayısı ikili etkileşimi, tutkal çeşidi-katman sayısı ikili etkileşimi, destek katmanı, ağaç türü-destek katmanı ikili etkileşimi, tutkal çeşidi-destek katmanı ikili etkileşimi, ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı üçlü etkileşimi, katman sayısı-destek katmanı ikili etkileşimi, tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı üçlü etkileşimi ve ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı-destek katmanı dördü etkileşimi düzeyinde istatistiki anlamda önemli çıkmıştır ($\alpha \leq 0,05$).

Varyans kaynaklarından ağaç türü-tutkal çeşidi-katman sayısı ve ağaç türü-katman sayısı-destek katmanı üçlü etkileşimleri farklı destek katmanları ile güçlendirilerek lamine edilmiş ağaç malzemenin makaslama dayanımı üzerinde etkili olmadığı görülmektedir.

3 ve üzeri değişken içeren faktörlerin başarı sıralamaları Duncan testi ile yapılmış, 2 değişkenli faktörler ise aritmetik ortalamalara göre değerlendirilmiştir.

Ağaç türü düzeyinde, en yüksek makaslama dayanımı sarıçamda ($9,241 \text{ N/mm}^2$), en düşük ise Doğu kayınında ($8,949 \text{ N/mm}^2$) tespit edilmiştir. Tutkal çeşidi düzeyinde, en yüksek eğilme dayanımı Pol-D₄ tutkalında ($10,630 \text{ N/mm}^2$), en düşük ise PVAc-D₄ ($7,558 \text{ N/mm}^2$) tespit edilmiştir. Katman düzeyinde ise en yüksek makaslama dayanımı 5 katmanlı örneklerde ($9,304 \text{ N/mm}^2$), en düşük ise 3 katmanlı örneklerde ($111,4 \text{ N/mm}^2$) tespit edilmiştir.

Ağaç türü-tutkal çeşidi ikili etkileşiminde elde edilen makaslama dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.58’de verilmiştir.

Çizelge 5.58. Ağaç türü-tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi (N/mm^2)

Ağaç Türü	Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	10,560	A	7,922	B
Doğu kayını	10,700	A*	7,193	C**
LSD $\pm 0,2744$				

$\bar{x}$: Aritmetik ort. HG: Homojenlik grubu *: En yüksek makaslama dayanımı **: En düşük makaslama dayanımı

Çizelge 5.58’e göre, en yüksek makaslama dayanımı Pol-D₄ tutkalı ile yapıştırılan Doğu kayınında ($10,700 \text{ N/mm}^2$) elde edilmiş, bunu sırasıyla Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan sarıçam ($10,560 \text{ N/mm}^2$), PVAc-D₄ tutkalı ile yapıştırılan sarıçam ($7,922 \text{ N/mm}^2$) ve PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan Doğu kayını ($7,193 \text{ N/mm}^2$) örnekler takip etmiştir.

Ağaç türü-katman sayısı ikili etkileşiminde elde edilen makaslama dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.59’da verilmiştir.

Çizelge 5.59. Ağaç türü-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm^2)

Katman Sayısı	Ağaç Türü			
	Sarıçam		Doğu Kayını	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	8,798	B**	8,972	B
5	9,683	A*	8,925	B
LSD $\pm 0,2744$				

Çizelge 5.59'a göre, en yüksek makaslama dayanımı 5 katmanlı sarıçamda (9,683 N/mm²) elde edilmiş, bunu sırasıyla 3 katmanlı Doğu kayını (8,972 N/mm²), 5 katmanlı Doğu kayını (8,925 N/mm²) ve 3 katmanlı sarıçam (8,798 N/mm²) örnekler takip etmiştir.

Tutkal çeşidi-katman sayısı ikili etkileşiminde elde edilen makaslama dayanımında farklılık oluşturan gurupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.60'da verilmiştir.

Çizelge 5.60. Tutkal çeşidi-katman sayısı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Katman Sayısı	Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	10,170	B	7,602	C
5	11,090	A*	7,513	C**
LSD $\pm$ 0,2744				

Çizelge 5.60'a göre, en yüksek makaslama dayanımı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 5 katmanlı örneklerde (11,090 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 5 katmanlı örneklerde (7,513 N/mm²) tespit edilmiştir. PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan 3 ve 5 katmanlı örnekler arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Destek katmanı düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.61'de verilmiştir.

Çizelge 5.61. Destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Destek Katmanı							
Karbon Fiber K.		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
7,348	C**	9,941	A	8,940	B	10,150	A*
LSD $\pm$ 0,2744							

Çizelge 5.61'e göre, en yüksek makaslama dayanımı destek katmansızda (10,150 N/mm²), en düşük ise karbon fiber kumaşta (7,348N/mm²) elde edilmiştir. Bambu kaplama ile destek katmansız örnekler arasındaki fark, istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen makaslama dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.62’de verilmiştir.

Çizelge 5.62. Ağaç türü-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Ağaç Türü	Destek Katmanı							
	K. Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Sarıçam	7,545	E	10,46	A	9,258	C	9,696	B
Doğu kayını	7,152	F**	9,419	BC	8,622	D	10,600	A*
LSD $\pm$ 0,3880								

Çizelge 5.62’ye göre, en yüksek makaslama dayanımı destek katmansız Doğu kayınında (10,600 N/mm²), en düşük ise karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında (7,152 N/mm²) tespit edilmiştir. Bambu kaplama destek katmanlı sarıçam ile destek katmansız Doğu kayını arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Tutkal çeşidi-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen makaslama dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.63’te verilmiştir.

Çizelge 5.63. Tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Tutkal Çeşidi	Destek Katmanı							
	Karbon Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Pol-D ₄	11,040	A	10,110	BC	11,400	A*	9,976	BC
PVAc-D ₄	3,658	E**	9,772	C	6,478	D	10,320	B
LSD $\pm$ 0,3880								

Çizelge 5.63’e göre, en yüksek makaslama dayanımı; Pol-D₄ çelik tel destek katmanlıda (11,400 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ karbon fiber kumaş destek katmanlıda (3,658 N/mm²) tespit edilmiştir. Pol-D₄; karbon fiber kumaş ile çelik tel arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı üçlü etkileşiminde elde edilen makaslama dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.64'te verilmiştir.

Çizelge 5.64. Ağaç türü-tutkal çeşidi-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Destek Katmanı	Ağaç Türü							
	Sarıçam				Doğu Kayını			
	Tutkal Çeşidi				Tutkal Çeşidi			
	Pol-D ₄		PVAc-D ₄		Pol-D ₄		PVAc-D ₄	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
Karbon Fib. K.	10,800	BC	4,294	I	11,280	B	3,022	J**
Bambu Kap.	11,010	B	9,920	DE	9,214	F	9,624	EF
Çelik Tel	10,810	BC	7,704	G	11,990	A*	5,252	H
D. Katmansız	9,622	EF	9,771	DEF	10,330	CD	10,880	BC
LSD $\pm$ 0,5488								

Çizelge 5.64'e göre, en yüksek makaslama dayanımı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan çelik tel destek katmanlı Doğu kayınında (11,990 N/mm²), en düşük ise PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında (3,022 N/mm²) tespit edilmiştir.

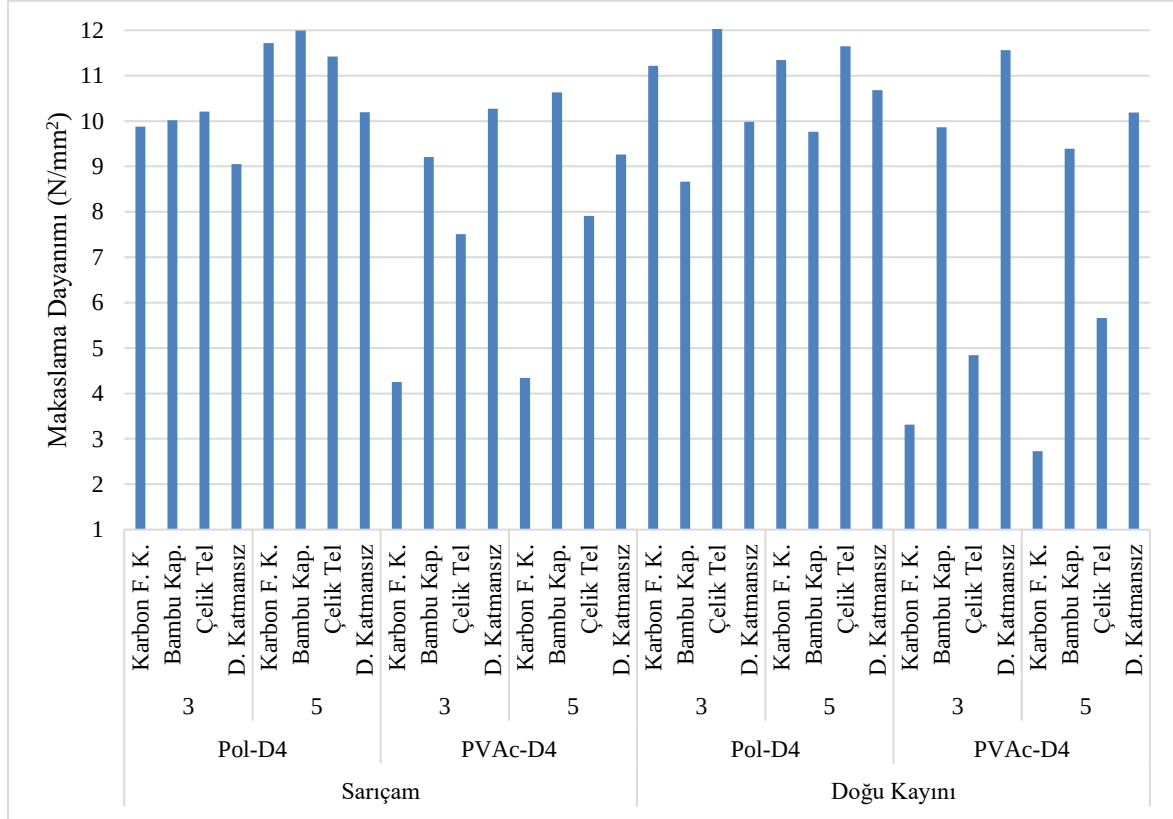
Katman sayısı-destek katmanı ikili etkileşiminde elde edilen makaslama dayanımında farklılık oluşturan grupları belirlemek için yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.65'te verilmiştir.

Çizelge 5.65. Katman sayısı-destek katmanı düzeyinde Duncan testi (N/mm²)

Katman Sayısı	Destek Katmanı							
	K. Fiber Kumaş		Bambu Kaplama		Çelik Tel		Destek Katmansız	
	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG	$\bar{x}$	HG
3	7,164	D**	9,437	B	8,723	C	10,220	A
5	7,553	D	10,450	A*	9,157	B	10,080	A
LSD $\pm$ 0,3880								

Çizelge 5.65'e göre, en yüksek makaslama dayanımı 5 katmanlı bambu kaplama destek katmanlıda (10,450 N/mm²), en düşük ise 3 katmanlı karbon fiber kumaş destek katmanlıda (7,164 N/mm²) tespit edilmiştir.

Çizelge 5.67'ye göre, en yüksek makaslama dayanımı 3 katmanlı Pol-D4 tutkal ile yapıştırılan çelik tel destek katmanlı Doğu kayınında (12,340 N/mm²), en düşük ise 5 katmanlı PVAc-D4 tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında (2,730 N/mm²) tespit edilmiştir.



Şekil 5.6. Makaslama dayanımı değerleri (N/mm²)

Ayrıca, makaslama dayanımı bakımından farklı destek katmanları ile güçlendirilerek lamine edilmiş ağaç malzemedan hazırlanan deney örnekleri ile masif olarak hazırlanan deney örneklerinin değişim yüzdeleri Çizelge 5.68'de verilmiştir.

Çizelge 5.68. Makaslama dayanımı bakımından masife kıyasla değişim yüzdeleri (%)

Ağaç Türü	Katman Sayısı	Destek Katmanı	Makaslama Dayanımı (N/mm ²)					
			Pol-D ₄			PVAc-D ₄		
			σ_m (N/mm ²)	Masif (N/mm ²)	Değişim (%)	σ_m (N/mm ²)	Masif (N/mm ²)	Değişim (%)
Sarıçam	3 Katman	Karbon Fib. K.	9,87	11,94	-17,34	4,25	11,94	-64,40
		Bambu Kap.	10,02		-16,08	9,21		-22,86
		Çelik Tel	10,21		-14,49	7,50		-37,18
		D. Katmansız	9,05		-24,20	10,27		-13,99
	5 Katman	Karbon Fib. K.	11,72		-1,84	4,34		-63,65
		Bambu Kap.	11,99		0,42	10,63		-10,97
		Çelik Tel	11,42		-4,35	7,91		-33,75
		D. Katmansız	10,19		-14,66	9,27		-22,36
Doğu Kayını	3 Katman	Karbon Fib. K.	11,22	13,27	-15,45	3,31	13,27	-75,06
		Bambu Kap.	8,66		-34,74	9,86		-25,70
		Çelik Tel	12,34		-7,00	4,84		-63,53
		D. Katmansız	9,98		-24,79	11,57		-12,81
	5 Katman	Karbon Fib. K.	11,34		-14,54	2,73		-79,43
		Bambu Kap.	9,77		-26,37	9,39		-29,24
		Çelik Tel	11,65		-12,21	5,66		-57,35
		D. Katmansız	10,68		-19,52	10,19		-23,21

Makaslama dayanımı bakımından masife kıyasla en yüksek yüzde değişimi 5 katmanlı Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan bambu kaplama destek katmanlı sarıçamda (%0,42) en düşük yüzde değişimi ise 5 katmanlı PVAc-D₄ tutkal ile yapıştırılan karbon fiber kumaş destek katmanlı Doğu kayınında (-%79,43) elde edilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda, laminasyon; teknoloji alanında, ahşap yapı elemanlarının kullanım yerinde performansını artırmak amacı ile farklı katman sayısı ve simetrisi prensibine dayanarak, ahşap yapı elemanlarının alt veya üst yüzeylerine ya da lameller arasına destek katmanı yerleştirilerek güçlendirme çalışmalarının yapıldığı görülmektedir. Güçlendirmede, karbon fiber, cam lifi, aramid lifler ve çeşitli çelik-metal-alüminyum tel örgüler destek katmanı malzemesi olarak tercih edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında; bambu kaplama, çelik tel örgü ve karbon fiber kumaş ile güçlendirilerek 3 ve 5 katmanlı, PVAc-D₄ ve Pol-D₄ tutkalları ile yapıştırılan sarıçam ve Doğu kayınından hazırlanan lamine ahşap örneklerin eğilme dayanımı, eğilmede elastikiyet modülü, dinamik eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve makaslama dayanımı özellikleri belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen veriler, destek katmansız lamine edilmiş ağaç malzemeler ile istatistiki olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, lamine edilmiş örnekler ile yekpare (masif) örnekler oransal olarak karşılaştırılarak faktörlerin başarı durumları değerlendirilmiştir.

Laminasyon işleminde, destek katmanı olarak kullanılan çelik tel örgünün, örneklerin yoğunluk değerlerinde artışa neden olduğu belirlenmiştir. Güçlendirme amaçlı destek katmanı malzeme uygulanan laminasyon işlemlerinde yoğunluk değerinde artış tespit edilmiş olup, bu çalışmada elde edilen veriler, literatür ile uyumluluk göstermiştir (Çiğdem, 2018; Uzel, 2015). Bu bağlamda, farklı destek katmanları ile güçlendirilerek lamine edilmiş ağaç malzemedeki yoğunluk artışının, kullanılan destek katmanı yoğunluğuna bağlı olarak farklılık gösterebileceğini ifade etmek mümkündür.

Eğilme dayanımında ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı, destek katmanı ve bu faktörlerin karşılıklı etkileşimleri %95 güven düzeyinde önemlidir. Buna göre, en yüksek eğilme dayanımı (141,6 N/mm²) Pol-D₄ tutkal ve bambu kaplama ile güçlendirilen 5 katmanlı Doğu kayını laminasyonunda elde edilirken, en düşük eğilme dayanımı (82,2 N/mm²) destek katmansız olarak Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan 5 katmanlı sarıçam laminasyonunda belirlenmiştir. Ağaç türü düzeyinde Doğu kayını, tutkal çeşidi düzeyinde Pol-D₄, katman sayısı düzeyinde 5 katman, destek katman malzemesi olarak bambu kaplama en yüksek

eğilme dayanımı göstermiştir. Daha önce yapılan bir çalışmada Doğu kayının laminasyon işlemine katılım oranı arttıkça dayanım özelliklerinin de arttığı belirlenmiştir (Burdurlu, Kılıç, İlçe ve Uzunkavak, 2007). Katman faktörü anlamında sarıçam ile yapılan laminasyon çalışmasında ise katman sayısı arttıkça eğilme dayanımı özelliklerinin arttığı tespit edilmiştir (Döngel, 1999). Bambu kaplama, destek katmanlı üretilen deney örnekleri arasında en yüksek değeri verirken karbon fiber kumaş, çelik tel örgü ve destek katmansız olarak üretilen deney örnekleri arasında eğilme dayanımı üzerine benzer özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bağlamda, eğilme dayanımı yüksek olması istenilen güçlendirme uygulamalarında bambu kaplama destek katmanı önerilebilir. Aynı zamanda lamine edilmiş bambu kerestenin fiziksel ve mekanik özellik araştırmalarının ilerlemesiyle maliyet ve çevresel uyumluluk açısından karlı olan en yenilikçi çözümlerin yaratılmasına katkı sağlayabileceği açıkça vurgulanmıştır (Dauletbek, Li, Xiong ve Lorenzo, 2021). Ayrıca, eğilme dayanımı deneyi esnasında karbon fiber kumaş destek katmanlı örneklerin delaminasyon şeklinde deforme olduğu gözlemlenmiştir (Resim 6.1).



Resim 6.1. Karbon fiber kumaş destek katmanlı örnekte deformasyon durumu

Deformasyonun kayma/delaminasyon şeklinde gerçekleşmesi, karbon fiber kumaşın tutkal ile mekanik ve kimyasal bağ kuramamasından kaynaklanmış olabilir. Bu durumun elimine edilebilmesi için karbon fiber kumaşın güçlendirme kullanımı öncesinde, tutkal vb. maddeler ile emprenye edilmesi önerilebilir.

Lamine edilmiş ağaç malzeme ile masif (işlemsiz) örneklerin eğilme dayanımının oransal karşılaştırılması sonucunda; Pol-D4 tutkal ve bambu kaplama ile güçlendirilen 3 katmanlı sarıçam laminasyonunda %35,2, Doğu kayını laminasyonunda ise %32,7 eğilme dayanımı

artışı sağladığı belirlenmiştir. Buna göre, eğilme dayanımının önemli olduğu durumlarda güçlendirme malzemesi olarak bambu kaplama kullanılması önerilebilir.

Eğilmede elastikiyet modülünde ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı, destek katmanı ve bu faktörlerin karşılıklı etkileşimleri %95 güven düzeyinde önemlidir. Buna göre, en yüksek eğilmede elastikiyet modülü ($9095,98 \text{ N/mm}^2$) Pol-D₄ tutkal ve bambu kaplama ile güçlendirilen 3 katmanlı sarıçam laminasyonunda elde edilirken, en düşük eğilmede elastikiyet modülü ($3925,94 \text{ N/mm}^2$) PVAc-D₄ tutkal ve karbon fiber kumaş ile güçlendirilen 3 katmanlı Doğu kayını laminasyonunda belirlenmiştir. Ağaç türü düzeyinde Doğu kayını, tutkal çeşidi düzeyinde Pol-D₄, destek katman malzemesi olarak bambu kaplama en yüksek dayanım gösterirken, katman sayısı düzeyinde 3 ve 5 katmanlı örnekler arasındaki fark önemsizdir. Tutkal çeşidi düzeyinde eğilmede elastikiyet modülü bakımından elde edilen sonuç literatürle uyumludur. Bu bağlamda, daha önce yapılan bir çalışmada laminasyon uygulamalarında poliüretan tutkalın polivinilasetat tutkalına göre daha iyi dayanım sağladığı tespit edilmiştir (Şenay, 1996). Yine elde edilen sonuçlara ve literatüre uyumlu olarak laminasyon uygulamasında polivinilasetat tutkalı kullanımı, eğilmede elastikiyet modülü anlamında artış sağlasa da elde edilen değerlerin aynı tür masif malzemelerden elde edilen değerlerle yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Kasal, Efe ve Dizel, 2010). Elastikiyet istenilen uygulamalarda bambu kaplamanın destek katmanı olarak kullanılması önerilebilir.

Lamine edilmiş ağaç malzeme ile masif (işlemsiz) örneklerin eğilmede elastikiyet modülünün oransal karşılaştırılması sonucunda; Pol-D₄ tutkal ve bambu kaplama ile güçlendirilen 3 katmanlı sarıçam laminasyonunda %62,78 Doğu kayını laminasyonunda ise %40,39 eğilmede elastikiyet modülü artışı sağladığı belirlenmiştir. Buna göre, eğilmede elastikiyet modülünün önemli olduğu durumlarda güçlendirme malzemesi olarak bambu kaplama kullanılması önerilebilir.

Basınç dayanımında ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı ve destek katmanı %95 güven düzeyinde önemlidir. Buna göre, en yüksek basınç dayanımı ($59,88 \text{ N/mm}^2$) Pol-D₄ tutkal ve karbon fiber ile güçlendirilen Doğu kayını laminasyonunda elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ($41,75 \text{ N/mm}^2$) PVAc-D₄ tutkal ve bambu kaplama ile güçlendirilen sarıçam laminasyonunda belirlenmiştir. Ağaç türü düzeyinde Doğu kayını ($50,94 \text{ N/mm}^2$), tutkal çeşidi düzeyinde Pol-D₄ ($50,87 \text{ N/mm}^2$), destek katman malzemesi olarak karbon

fiber kumaş ($52,43 \text{ N/mm}^2$), katman sayısı düzeyinde 3 katmanlı ($49,27 \text{ N/mm}^2$) örnekler en yüksek basınç dayanımı göstermiştir.

Lamine edilmiş ağaç malzeme ile masif (işlemsiz) örneklerin basınç dayanımının oransal karşılaştırılması sonucunda; Pol-D₄ tutkal ve bambu kaplama ile güçlendirilen 5 katmanlı sarıçam laminasyonunda %34,88, Doğu kayını laminasyonunda ise %35,11 basınç dayanımı artışı sağladığı belirlenmiştir. Poliüretan tutkal (Pol-D₄), ağaç malzeme-destek katmanı malzemesi-ağaç malzeme katmanları arasında kurulan kimyasal bağların daha güçlü olmasını sağlamıştır. Daha önce yapılan çalışmalar, bu bulguları desteklemektedir (Uzel, Togay, Anıl, ve Söğütü, 2018). Buna göre, basınç dayanımının önemli olduğu durumlarda Pol-D₄ tutkalın kullanılması önerilebilir.

Dinamik eğilme dayanımında ağaç türü, destek katmanı ve bu faktörlerin karşılıklı etkileşimleri %95 güven düzeyinde önemli, tutkal çeşidi ve katman sayısı ise önemsizdir. Buna göre, en yüksek dinamik eğilme dayanımı ($106,5 \text{ kJ/m}^2$) PVAc-D₄ tutkal ve karbon fiber kumaş ile güçlendirilen 5 katmanlı sarıçam laminasyonunda elde edilirken, en düşük dinamik eğilme dayanımı ($54,17 \text{ kJ/m}^2$) Pol-D₄ tutkal ile yapıştırılan destek katmansız 5 katmanlı sarıçam laminasyonunda belirlenmiştir. Ağaç türü düzeyinde Doğu kayını ($81,21 \text{ kJ/m}^2$), destek katman malzemesi olarak karbon fiber kumaş ($90,07 \text{ kJ/m}^2$) en yüksek dinamik eğilme dayanımını göstermiştir.

Lamine edilmiş ağaç malzeme ile masif (işlemsiz) örneklerin dinamik eğilme dayanımının oransal karşılaştırılması sonucunda; PVAc-D₄ tutkal ve karbon fiber kumaş ile güçlendirilen 3 katmanlı sarıçam laminasyonunda %136,4, PVAc-D₄ tutkal ve karbon fiber kumaş ile güçlendirilen 5 katmanlı Doğu kayını laminasyonunda ise %101,5 dinamik eğilme (şok) dayanımı artışı belirlenmiştir. Dinamik eğilme dayanımı üzerine yapılan bir çalışmada, sarıçam-poliüretan esaslı tutkal-karbon fiber kumaş kombinasyonunda masif deney örneklerine oranla artış sağlandığı belirlenmiştir (Mıstak, 2013). Bu çalışmada elde edilen veriler, literatürdeki çalışmalar ile benzerlik göstermekte olup, dinamik eğilme dayanımının önemli olduğu durumlarda güçlendirme malzemesi olarak karbon fiber kumaş kullanımı önerilebilir.

Makaslama dayanımında ağaç türü, tutkal çeşidi, katman sayısı, destek katmanı ve bu faktörlerin karşılıklı etkileşimleri (ağaç türü x tutkal çeşidi x katman sayısı etkileşimi hariç) %95 güven düzeyinde önemlidir. Buna göre, en yüksek makaslama dayanımı ($12,34 \text{ N/mm}^2$) Pol-D₄ tutkal ve çelik tel hasır ile güçlendirilen 3 katmanlı Doğu kayını laminasyonunda elde edilirken, en düşük makaslama dayanımı ($2,73 \text{ N/mm}^2$) PVAc-D₄ tutkal ve karbon fiber kumaş ile güçlendirilen 5 katmanlı Doğu kayını laminasyonunda belirlenmiştir.

Ağaç türü düzeyinde sarıçam ($2,73 \text{ N/mm}^2$), tutkal çeşidi düzeyinde Pol-D₄ ($10,63 \text{ N/mm}^2$) ve katman sayısı düzeyinde 5 katmanlı ($9,304 \text{ N/mm}^2$) örnekler en yüksek makaslama dayanımı gösterirken, destek katman malzemesi olarak bambu kaplama ($9,941 \text{ N/mm}^2$) ile destek katmansız ($10,15 \text{ N/mm}^2$) örnekler arasındaki fark önemsizdir. Buna göre, makaslama dayanımı istenilen uygulamalarda destek katmanı ile güçlendirme yapılmaması önerilebilir.

Lamine edilmiş ağaç malzeme ile masif (işlemsiz) örneklerin makaslama dayanımının oransal karşılaştırılması sonucunda, tüm kombinasyonlarda %0,42-79,43 makaslama dayanımının azaldığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, güçlendirilmiş ağaç malzemenin kullanımı, başta ahşap yapılar olmak üzere birçok sektörde gitgide yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, yapılan deneysel analizler sonucunda, mekanik dayanımı ağaç malzemenin daha yüksek olan karbon fiber kumaş, bambu kaplama ve çelik tel örgünün güçlendirme malzemesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Bu bağlamda, güçlendirilmiş lamine ağaç malzemenin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Ağaç malzemenin masif olarak kullanılması yerine, farklı destek katmanları ile lamine edilerek güçlendirilmesi halinde, ahşap yapı elemanının mekanik direnç özellikleri iyileştirilebilir.
2. Boyutsal sınırlılıkları olan ağaç malzemenin bu dezavantajı, laminasyon teknolojisi ile istenilen form ve boyutlarda üretim yapılarak aşılabılır.
3. Laminasyon teknolojisi kullanılarak daha küçük ağaç malzeme kesiti ile istenilen dayanımda ahşap yapı elemanı üretimine olanak sağlanabilir. Böylece, beton ve metal

esaslı malzemeler yerine daha yüksek dayanım gösteren lamine edilmiş ağaç malzeme tercih edilebilir.

4. Kesit ölçülerinde küçültme yapılarak ahşap yapı elemanın kullanım yerinde işgal ettiği hacim azaltılabilir.
5. Karbon fiber kumaş, bambu kaplama ve çelik tel örgü ile yapılan güçlendirme işlemi ile yapısal eleman ölçü gereksinimleri, ağırlık ve maliyetler azaltılabilir. Bambu kaplama ve çelik tel örgü, karbon fiber kumaştan daha ucuz olduğu için destek katmanı olarak tercih edilebilir.
6. Farklı destek katmanları ile lamine edilmiş ağaç malzeme, destek katmansız ağaç malzemeye göre boyutsal değişim (çalışma) bakımından daha kararlı bir yapıya sahiptir. Böylece, kullanım alanının daha da yaygınlaşması mümkündür.
7. Lamine edilmiş ağaç malzemeyi güçlendirme amacı ile kullanılan destek katmanları, ağaç malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamıştır. Güçlendirme amaçlı farklı destek malzeme çeşitleri kullanılarak çalışmalar yapılabilir.
8. Güçlendirme kombinasyonlarının davranış özelliklerinin belirlenmesinde, deneysel çalışmalar ile birlikte, simülasyonların yapılması, nümerik ve matematiksel modellerinin oluşturulması uygulama kolaylığı ve zaman tasarrufu sağlanabilir.
9. Ağaççşleri Endüstrisinde, farklı türlerden ağaç malzemeler, tutkallar, farklı destek katmanları, değişken katman sayısı ve dizilim denemeleri yapılarak yüksek dayanım özellikleri elde edilebileceğı ön görölmektedir.

KAYNAKLAR

- Altınok, M., Burdurlu, E. and Özkaya, K. (2008). Deformation analysis of curved laminated structural wood elements. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1643-1647.
- ASTM D 3110. (1988). Adhesive used in nonstructural glued lumber product. ASTM Standards, PA, USA.
- Bal, B. C. ve Özyurt, H. (2015). Cam elyaf dokuma ile güçlendirilmiş tabakalı kaplama kerestenin bazı teknolojik özellikleri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(1), 9-18.
- Biblis, E. J. (1965). Analysis of wood-fiberglass composite beams within and beyond the elastic region. *Forest Products Journal*, 15 (2), 81-89.
- Burdurlu, E., Kılıç, M., İlçe, A. C. and Uzunkavak, O. (2007). The effects of ply organization and loading direction on bending strength and modulus of elasticity in laminated veneer lumber (LVL) obtained from beech (*Fagus orientalis* L.) and lombardy poplar (*Populus nigra* L.). *Construction and Building Materials*, 21(8), 1720-1725.
- BS EN 204. (1991). Non-structural adhesives for joining of wood and derived timber products. British Standards, England.
- Chen, G., Yu, Y., Li, X. and He, B. (2020). Mechanical behavior of laminated bamboo lumber for structural application: An Experimental Investigation. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(6), 53-63.
- Çiğdem, E. (2018). Karbon ve cam elyaf ile güçlendirilmiş ısıtılmış kayın odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*. Kütahya, Türkiye: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 36-58.
- Çiğdem, E. and Perçin, O. (2023). Some physical and mechanical properties of heat-treated, reinforced laminated veneer lumber (LVL) with carbon fiber and glass fiber. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(2), 653-664.
- Dauletbek, A., Li, H., Xiong, Z. and Lorenzo, R. (2021). A review of mechanical behavior of structural laminated bamboo lumber. *Sustainable Structures*, 1(1), 1-19.
- Demetçi, E. Y. (1991). Önemli bazı ağaç türlerinin PVAc ve epoksi tutkalları ile yapışma özellikleri. *Doktora Tezi. İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 10-12.
- Demirel, G. K. ve Temiz, A. (2015). Ahşap korumada çevre dostu modifikasyon yöntemleri. *Selçuk Teknik Dergisi*, Özel sayı (1), 1016-1032.
- Dilik, T. (1997). Lamine ağaç malzemeden pencere profili üretimi ve bazı kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Doktora Tezi. İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 20-23.
- DIN 68140. (1998). Finger joints in wood, part 1: finger jointed structural timber. Deutsche Norm, Berlin.

- Dlamini, L. C., Fakudze, S., Makombe, G. G., Muse, S. and Zhu, J. (2022). Bamboo as a valuable resource and its utilization in historical and modern-day china. *BioResources*, 17(1), 1926-1938.
- Döngel, N. (1999). Lamine Ahşap Malzemede Ağaç Türü, Katman Sayısı ve Tutkal Çeşidinin Eğilme Direncine Etkileri . *Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 18-19.
- Echavarria, C., Jimenez, L., & Ochoa, J. C. (2012). Bamboo-reinforced glulam beams: an alternative to fiberglass-reinforced glulam beams. *Dyna*, 79(174), 24-30.
- Eren, S. (1998). Okaliptus (*Eucalyptus camaldulensis*) Odunundan üretilen lamine ağaç malzemelerin bazı mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine tutkal türü ve tomruk buharlama süresinin etkileri. *Yüksek Lisans Tezi. K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 30-31.
- Görgün, H. V., Ünsal, Ö. ve Dindar, G. (2016). Yapısal amaçlı ağaç malzemede mühendislik sorunları ve çözüm önerileri . 8. *Ulusal Çatı ve Cephe Sempozyumu*. İstanbul: ÇATIDER, (8), 1-9.
- Güler, C. ve Subaşı, S. (2012). Karbon ve cam lifi ile güçlendirilmiş lamine sarıçam. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Özel Sayı, 78-82.
- Güntekin, E. ve Aydın, T. Y. (2015). Kızılçamdan (*pinus brutia ten.*) üretilen tabakalı kerestede cam lifi ve çelik plaka ile güçlendirmenin eğilme performansına etkisi. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 15(1), 73-77.
- Hoyle, A. and Woste, B. (1989). *Handbook Of Wood And Wood Based Materials*. Madison, USA: USDA Forest Service, 1, 400-406.
- İnternet: Composites Portal, Construction / The world's first building made of advanced fiber reinforced wood. URL: <https://www.compositesportal.com/mobile/post.cfm?ar=10963>, Son Erişim Tarihi: 11.09.2022.
- İnternet: Kleibreit, Adhesives / Klebstoffe. URL: <https://www.kleiberit.com/de/klebstoffe/>, Son Erişim Tarihi: 11.11.2022.
- İnternet: Krom Tel, Ürünler / Tel / Paslanmaz Çelik Örgülük Teller. URL: <https://www.kromtel.com.tr/urunler/tel/paslanmaz-celik-orguluk-teller#product>, Son Erişim Tarihi: 11.09.2022.
- İnternet: Louis Paulsen, Professional / Applications / Project Gallery / Educational Facilities / Faculty of Education Cambridge University, Photographer: Philip Vile. URL: <https://www.louispaulsen.com/en-us/professional/applications/projects-cases/educational-facilities/faculty-of-education-cambridge-university>, Son Erişim Tarihi: 15.12.2022.
- İnternet: Structurlam, What's New / News / New Building For the Tall Tree Health Centre in Victoria. URL: <https://www.structurlam.com/whats-new/news/new-building-for-the-tall-tree-health-centre-in-victoria/>, Son Erişim Tarihi: 14.12.2022.

- İnternet: Techlam, News / Glulam bridge in Taiwan. URL: <https://techlam.nz/glulam-bridge-taiwan/>, Son Erişim Tarihi: 13.12.2022.
- Karaman, A. ve Yıldırım, M. N. (2019). Cam elyaf kumaş ile desteklenmiş ahşap lamine malzemelerde eğilmede elastikiyet modülü. *IV. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi – Mühendislik*, Ankara, 14-20.
- Karaman, A. ve Yıldırım, N. (2018). Cam elyaf kumaş destekli (GFRP) lamine kestane malzemenin eğilme dayanımının belirlenmesi. *International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, Ankara: SETSCI, 329-336.
- 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. ve Dizel, T. (2010). Masif ve lamine edilmiş ağaç malzemelerde eğilme direnci ve elastikiyet modülünün belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 13(3), 183-190.
- Keskin, H. (2001). Pvac-d4 tutkalı ile 4 katmanlı olarak lamine edilmiş sarıçam (pinus sylvestris l.) toros sediri (cedrus libani a. rich) doğu kayını (fagus orientalis lipsky) ve sapsız meşe (quercus petrea l.) odunlarının teknolojik özellikleri. *Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 80-87.
- Keskin, H. ve Togay, A. (2003). Doğu kayını ve karakavak kombinasyonu ile üretilmiş lamine ağaç malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Orman Fakültesi Dergisi*, 4(2), 101-114.
- Kopač, J and Šali, S. (2003). Wood: an important material in manufacturing technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1), 134-142.
- Laufenberg, T., Rowlands, R. and Krueger, G. (1984). Economic feasibility of synthetic fiber reinforced laminated veneer lumber (LVL). *Forest Products Journal*, 34(4), 15-22.
- Merev, N. (2003). *Odun Anatomisi ve Odun Tanıtımı*. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Matbaası, 34-37.
- Mıstak, O. (2013). Sarıçam ağaç malzeme ve farklı fiber (frp) kumaşları ile elde edilen lamine ağaç malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük. 40-45.
- Moradpour, P., Pirayesh, H., Gerami, M. and Jouybari, I. R. (2018). Laminated strand lumber (lsl) reinforced by GFRP; mechanical and physical properties. *Construction and Building Materials*, 158, 236-242.
- Osmannezhad, S., Faezipour, M. and Ebrahimi, G. (2014). Effects of GFRP on bending strength of glulam made of poplar (populus deltoids) and beech (fagus orientalis). *Construction and Building Materials*, 51, 34-39.
- Örs, Y. ve Keskin, H. (2008). *Ağaç Malzeme Teknolojisi*. Ankara: Gazi Kitabevi, 1-3.
- Özen, R. ve Sönmez, A. (1996). Dış hava şartlarının verniklerin katman sertliğine etkileri. *Tr. J. of Agriculture and Forestry*, 23 (1999), 323-328.

- Öztürk, R. ve Arıoğlu, N. (2006). Türk sarıçamından lamine ahşap kirişlerin mekanik özellikleri. *İTÜ Dergisi*, 5 (2), 25-36.
- Perçin, O., Özbay, G. ve Ordu, M. (2009). Farklı tutkallarla lamine edilmiş ahşap malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19, 109-120.
- Qi, Y., Fang, H., Shi, H., Liu, W., Qi, Y. and Bai, Y. (2017). Bending performance of gfrp-wood sandwich beams with lattice-web reinforcement in flatwise and sidewise directions. *Construction and Building Materials*, 156, 532-445.
- Söğütü, C. (2004). Bazı yerli ağaç türlerinin kündekari yapımında kullanım imkanları. *Doktora Tezi, Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 26-27.
- Söğütü, C., Nzokou, P., Koc, I., Tutgun, R., ve Döngel, N. (2016). The effects of surface roughness on varnish adhesion strength of wood materials. *Journal of Coatings Technology and Research*, 13(5), 863-870.
- Stark, N., & Cai, Z. (2021). Wood-based composite materials panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials. *Wood Handbook: Wood As An Engineering Material*, 11, 2-11.
- Sun, W., Luo, Y. and Sun, H. (2018). Experimental studies on the elastic properties of carbon fiber reinforced polymer composites prefabricated of unidirectional carbon fiber fabrics and a modified rule of mixtures in the parallel direction. *Advanced Composites Letters*, 27(1), 34-43.
- Şeker, C. (2011). Çeşitli malzemeler ile desteklenmiş ahşap lamine elemanların direnç özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 17-18.
- Şenay, A. (1996). Ahşap lamine taşıyıcı elemanların mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine araştırmalar. *Doktora Tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 27-30.
- Theakston, F. H. (1965). A feasibility study for strengthening timber beams with fibreglass. *Can Agric Eng*, 17-19.
- TS EN 322. (1999). *Ahşap esaslı levhalar-rutubet miktarının tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 323. (1999). *Ahşap esaslı levhalar-birim hacim ağırlığının tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 386. (2006). *Tutkallanmış lamine kereste- performans özellikleri ve asgari imalat şartları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 408+A1. (2014). Ahşap yapılar - Yapı kerestesi ve yapıştırılmış lamine kereste – Bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS ISO 13061-10. (2021). *Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri-Kusursuz küçük ahşap numunelerin deney yöntemleri-Bölüm 10: Çarpmaya karşı eğilme mukavemetinin tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- Ulupınar, M. (1998). Lamine edilmiş melez kavak'ın teknolojik özelliklerinin tesbiti. *Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 29-31.
- Usta, İ. (2015). Ağaç malzeme fiziksel özelliklerinin tespitinde ve ahşap koruma performans değerlendirmesinde örnek bir kılavuz olarak şematik rehber kullanımı. *Selçuk-Teknik Dergisi, Özel Sayı-1 (UMK-2015)*, 407-420.
- Usta, İ. (2015). Ahşap üzerine betimlemeler: kültürlerarası etkileşim aracı olan ahşabın “değerli bir nesne” olarak kabul edilip özümsemesi (ahşap güzeldir). *Mesleki Bilimler Dergisi*, 4 (2), 39-54.
- Uzel, M. (2015). Lamine ahşap yapı elemanlarının mekanik özelliklerine destek katmanı ve lamel kalınlığı etkisinin incelenmesi. *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara. 120-123.
- Uzel, M., Togay, A., Anıl, Ö. ve Söğütü, C. (2018). Lamine Ahşap Yapı Elemanlarının Basınç Dayanımına Katmanlar Arasına Yerleştirilen Destek Malzemelerinin Etkisi. *V. Uluslararası Mobilya Kongresi* 1-11.
- Van der Lugt P, v. d. (2005). An environmental economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Construction and Building Materials*, 20, 648–56.
- Wangaard, F. F. (1964). Elastic deflection of wood–fiberglass composite beams. *Forest Products Journal*, 13 (6), 256-260.
- Xiao, Y. and Ma, J. (2012). Fire simulation test and analysis of laminated bamboo frame building. *Construction and Building Materials*, 34, 257–266.
- Xu, Q., Leng, Y., Chen, X., Harries, K. A. and Chen, L. (2018). Experimental study on flexural performance of gluedlaminated-timber-bamboo-beams. *Materials and Structures*, 51(9), 2-14.
- Yıldırım, M. N., Karaman, A. and Uslu, E. (2018). Determination of the bending strength of linden wood laminated (tiliatomentosa) materials reinforced with glass fiber fabrics. H. Babacan içinde, *Mimarlık Biliminde Güncel Akademik Çalışmalar*. Ankara: Gece Kitaplığı, 131-148.
- Yıldırım, N., Karaman, A., Tokdemir, V. ve Ertekin, S. (2018). Cam elyaf kumaşı ile güçlendirilmiş kavak lamine ahşap malzemenin bazı mekanik özellikleri. 3. *Uluslararası Mühendislik ve Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, Kocaeli, 319-320.



Gazili olmak ayrıcalıktır