



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİT ÇAPRAZ LAMİNE KERESTELERİNİN
DENEYSEL VE NUMERİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil KARATAY

Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Orman Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2025

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİT ÇAPRAZ LAMİNE KERESTELERİNİN DENEYSEL VE
NUMERİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil KARATAY

22434967008

**Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Orman Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

Danışman: Doç. Dr. Mesut UYSAL

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sedef KOCAKAPLAN SEZGİN

TEMMUZ 2025





20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 230Y004 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı SOYADI: Halil KARATAY

İmzası:

XXXXXX



*Her daim yanımda olan aileme,
fedakârlıklarıyla yolumu aydınlatan hocalarıma ve
beni hiç yalnız bırakmayan dostlarıma*

ÖNSÖZ

“Hibrit çapraz lamine kerestelerinin deneysel ve numerik analizi” adlı bu çalışma, Bursa Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanması sürecinde bilgi, tecrübe ve akademik rehberlikleriyle bana yol gösteren, araştırma boyunca karşılaştığım her bilimsel sorunda sabır ve özveriyle yanımda olan değerli danışmanım Doç. Dr. Mesut UYSAL’a en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, araştırma konusunun belirlenmesinden deneysel tasarıma, verilerin analizinden sonuçların değerlendirilmesine kadar her aşamada yönlendirici ve geliştirici katkılar sağlamıştır.

Tezimin şekillenmesinde değerli bilimsel görüşleriyle katkıda bulunan ve çok disiplinli bir bakış açısı kazanmama yardımcı olan ikinci danışmanım Sedef KOCAKAPLAN SEZGİN’e, akademik vizyonunu benimle paylaşarak çalışmanın içeriksel derinliğine önemli katkılarda bulunduğu için teşekkür ederim.

Jüri üyelerim Doç. Dr. Çağatay TAŞDEMİR ve Doç. Dr. Arif Çağlar KONUKÇU’ya, tez savunması sürecindeki yapıcı değerlendirmeleri, eleştirel yaklaşımları ve akademik katkıları ile çalışmamın kalitesinin artmasına verdikleri destekten ötürü şükranlarımı sunarım. Ayrıca, çalışma süresince akademik desteğini esirgemeyerek çalışmaya yapmış olduğu katkılardan dolayı Prof. Dr. Ergün GÜNTEKİN’ine de şükranlarımı sunarım.

Araştırmanın deneysel aşamalarında laboratuvar altyapısının etkin bir şekilde kullanımı, deney düzeneklerinin kurulumu ve ölçüm süreçlerinde gösterdiği teknik destek ile çalışmama büyük katkılar sağlayan Arş. Gör. Doğan MEMİŞ’e teşekkür ederim. Ayrıca, deney örneklerinin hazırlanmasında gösterdiği özenli çalışmaları ve yardımsever tutumuyla bu sürecin sağlıklı ilerlemesini sağlayan Mobilya Atölyesi Teknisyeni Semih AKIN’a da içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu yoğun süreç boyunca her zaman yanımda olarak manevi desteğini esirgemeyen aileme, bana inanan ve motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan arkadaşlarıma da gönülden teşekkür ederim. Onların sabrı, anlayışı ve desteği olmasaydı bu çalışmanın başarıyla tamamlanması mümkün olmazdı.

Bu çalışmanın ileride bu konuda yapılacak olan çalışmalara ışık tutmasını ve ilgilienlere yol gösterici olmasını dilerim.

Temmuz / 2025

Halil KARATAY

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Ahşabın Yapısal ve Fiziksel Özellikleri	4
1.2 ÇLK ve Özellikleri	4
1.3 Ahşap Malzemelerin Çevresel ve Sürdürülebilirlik Açısından Önemi	6
1.4 Ahşabın Korunması ve İşlenmesi	7
1.5 Sonlu Elemanlar Analizi	7
1.6 Kullanılan Ağaç Türleri ve Özellikleri	8
1.6.1 Uludağ göknarı (<i>Abies bornmülleriana mattf</i>)	8
1.6.1.1 Etimolojisi	8
1.6.1.2 Morfolojik özellikleri	10
1.6.1.3 Ekolojik özellikleri	11
1.6.1.4 Ülkemizdeki yayılışı	12
1.6.1.5 Uludağ Göknarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	13
1.6.1.6 Endüstriyel kullanım alanları	14
1.6.2 Ladin (<i>Picea orientalis</i>)	14
1.6.2.1 Etimolojisi	14
1.6.2.2 Morfolojisi	15
1.6.2.3 Ekolojik özellikleri	15
1.6.2.4 Türkiye’deki yayılışı	16
1.6.2.5 Fiziksel özellikler	17
1.6.2.6 Mekanik özellikler	18
1.6.3 Kanada kavağı (<i>Populus X canadensis moench</i>)	18
1.6.3.1 Etimolojisi	18
1.6.3.2 Morfolojik özellikleri	19
1.6.3.3 Ekolojik özellikleri	19
1.6.3.4 Türkiye’deki yayılışı	20
1.6.3.5 Kanada kavağının endüstride kullanım alanları	21
1.6.3.6 Kanada kavağının fiziksel ve mekanik özellikleri	22
1.6.3.7 Mekanik özellikler	23
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE ÇALIŞMANIN HİPOTEZİ, AMACI, HEDEFLERİ VE ÖNEMİ.....	25
2.1 Literatür Artaştırması	25

2.1.1 ÇLK Malzemelerde Odun Türünün Etkisini Analiz Eden Çalışmaların Literatür Özeti	34
2.1.2 ÇLK Malzemelerde Katman Kalınlığının Etkisini Analiz Eden Çalışmaların Literatür Özeti	36
2.1.3 ÇLK Malzemelerde Tutkal Türünün Etkisini Analiz Eden Çalışmaların Literatür Özeti	38
2.1.4 ÇLK Malzemelerde Pres Basıncı ve Süresinin Etkisini Analiz Eden Çalışmaların Literatür Özeti	40
2.1.5 ÇLK Malzemelerin Sonlu Elemanlar Analizini İnceleyen Çalışmaların Literatür Özeti	41
2.2 Araştırma Boşluğu.....	43
2.3 Araştırmanın Amacı, Hedefleri ve Kapsamı	44
2.4 Çalışmanın Hipotezi ve Araştırma Soruları	46
2.5 Çalışmanın Önemi.....	46
3. MATERYAL VE METOT	49
3.1 ÇLK Malzemelerinin Hazırlanması	50
3.1.1 Yoğunluk ve rutubet miktarının belirlenmesi.....	52
3.1.2 Masif ve ÇLK malzemelerin eğilme direnci ve elastikiyet modülünün belirlenmesi	52
3.1.3 ÇLK malzemesinin kayma modülünün belirlenmesi.....	54
3.1.4 ÇLK malzemelerin yuvarlama kesme dayanımının belirlenmesi.....	55
3.1.5 Masif ve ÇLK malzemelerin basma dayanımı	55
3.1.6 Masif ve ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesinin belirlenmesi.....	56
3.1.7 Bindirme kayma dayanımının belirlenmesi.....	57
3.1.8 ÇLK malzemelerin tahribatsız muayene yöntemleri ile dinamik elastikiyet modülünün belirlenmesi.....	59
3.1.9 ÇLK malzemesinin hafifliğinin belirlenmesi.....	60
3.1.10 ÇLK malzemesinin sonlu elemanlar analizi	61
3.1.11 Verilerin istatistiksel analizi	62
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	63
4.1 Yoğunluk ve Rutubet	63
4.2 Eğilme Özellikleri	66
4.3 Kayma Modülü.....	77
4.4 Yuvarlama Kesme Dayanımı	82
4.5 Basma Dayanımı	87
4.6 Vida Tutma Kapasitesi	93
4.7 Bindirme Kayma Dayanımı	100
4.8 Hafiflik	102
4.9 Tahribatsız Muayene	103
4.10 Sonlu Elemanlar Analizi	107
4.11 Tartışma.....	109
4.11.1 Çalışmanın Bulgularının Değerlendirilmesi	109
4.11.2 Çalışmanın Sınırlılıkları.....	110
4.11.3 Hipotezlerin Değerlendirilmesi	110
4.11.4 Gelecek Araştırma Fırsatları.....	111
4.11.5 Tezin Akademik, Uygulamalı ve Yönetimsel Etkileri.....	112
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR	117
ÖZGEÇMİŞ.....	125

KISALTMALAR

ANSYS	: Swanson Analysis Systems
ÇLK	: Çapraz Lamine Kereste
G	: Kayma Modülü
LVL	: Laminated Veneer Lumber
MÜAM	: Mühendislik Ürünü Ağaç Malzemeler
MOR	: Eğilme Dayanımı
PRF	: Fenol-Rezosiyanol-Formaldehit
PUR	: Poliüretan

SEMBOLLER

ρ	: Malzemelerin yoğunluğu (gr/cm ³)
V	: Malzemelerin hacmidir (cm ³)
ω	: Malzemelerin ağırlığı (gr)
RM	: Malzemelerin rutubet miktarı (%)
ω_{12}	: Malzemelerin deney şartlarındaki rutubetli ağırlı (gr)
ω_0	: Malzemelerin kurutulduktan sonraki ağırlıdır (gr)
ED_{masif}	: Masif malzemelerin eğilme dayanımı (MPa)
F_{maks}	: Deney sırasında elde edilen maksimum yük miktarı (N)
L	: Destek noktaları arasındaki açıklık (mm)
b	: Örnek enine kesit genişliği (mm)
h	: Örnek enine kesit yüksekliği (mm)
ED_{CLK}	: CLK malzemelerin eğilme dayanımı (MPa)
ΔF	: Elastik bölgede bulunan iki kuvvet arası fark (N)
Δd	: İki kuvvet noktası karşılığında oluşan deformasyonların farkı (mm)
a	: Yükleme noktasının destek noktasına uzaklığı (mm)
EM_{masif}	: Masif malzemelerin elastikiyet modülü (MPa)
EM_{CLK}	: CLK malzemelerin elastikiyet modülü (MPa)
I	: Atalet momenttir (mm ⁴)
G	: Malzemelerin kayma modülü (MPa)
k_G	: Dikdörtgen enine kesitler için 1,2 katsayısıdır
EM_{app}	: Malzemelerin meşru elastikiyet modülü (MPa)
f_r	: Yuvarlama kesme dayanımı (MPa)
t	: Çrnek kalınlığı (mm)
f_b	: Malzemenin basma dayanımı
f	: Malzemelerin maksimum vida tutma kapasitesi (MPa)
π	: Pi Sayısı
r	: Vida dış yarıçapı (mm)
d	: Vida penetrasyon derinliği (mm)
f_{makas}	: Malzemelerin çekmede makaslama direnci (MPa)

l : Yüzey uzunluğu (mm)
 φ : Malzemenin hafifliği (MPa.m³/kg)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Katmanlarda kullanılan parça boyutları (mm).	51
Çizelge 3.2: Malzemelerin elastik sabiti (MPa).	61
Çizelge 4.1: Masif Malzemelerin yoğunluk ve rutubet miktarları.	63
Çizelge 4.2: Masif malzemelerin yoğunluğu için tek-yönlü varyans analizi.	64
Çizelge 4.3: Masif malzemelerin yoğunluğu için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.	64
Çizelge 4.4: ÇLK malzemelerin yoğunluk ve rutubet miktarı.	65
Çizelge 4.5: ÇLK malzemelerin yoğunluğu için iki-yönlü varyans analizi.	65
Çizelge 4.6: ÇLK malzemelerin yoğunluğu için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.	66
Çizelge 4.7: Masif malzemelerin eğilme direnci için tek-yönlü varyans analizi.	67
Çizelge 4.8: Masif malzemelerin eğilme direnci için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.	67
Çizelge 4.9: Masif malzemelerin elastikiyet modülü için tek-yönlü varyans analizi.	68
Çizelge 4.10: Masif malzemelerin elastikiyet modülü için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.	68
Çizelge 4.11: ÇLK malzemelerin eğilme direnci için iki-yönlü varyans analizi.	72
Çizelge 4.12: ÇLK malzemelerin eğilme direnci için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.	72
Çizelge 4.13: ÇLK malzemelerin elastikiyet modülü için iki-yönlü varyans analizi.	76
Çizelge 4.14: ÇLK malzemelerin elastikiyet modülü için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.	77
Çizelge 4.15: ÇLK malzemelerin kayma modülü için iki-yönlü varyans analizi.	81
Çizelge 4.16: ÇLK malzemelerin kayma modülü için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.	82
Çizelge 4.17: ÇLK malzemelerin yuvarlama kesme dayanımı için iki-yönlü varyans analizi.	86
Çizelge 4.18: ÇLK malzemelerin yuvarlama kayma dayanımı için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.	86
Çizelge 4.19: Masif malzemelerin basma dayanımı için tek-yönlü varyans analizi.	88
Çizelge 4.20: Masif malzemelerin basma dayanımı için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.	88
Çizelge 4.21: ÇLK malzemelerin basma dayanımı için iki-yönlü varyans analizi. ..	92
Çizelge 4.22: ÇLK malzemelerin basma dayanımı için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.	93
Çizelge 4.23: Masif malzemelerin vida tutma kapasitesi için tek-yönlü varyans analizi.	94

Çizelge 4.24: Masif malzemelerin vida tutma kapasitesi için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.....	95
Çizelge 4.25: ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesi için iki-yönlü varyans analizi.	99
Çizelge 4.26: ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesi için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.....	100
Çizelge 4.27: Aynı ve farklı odun türüne sahip malzemelerin bindirme kayma dayanımı değerleri için tek-yönlü varyans analizi	101
Çizelge 4.28: Aynı ve farklı odun türüne sahip malzemelerin bindirme kayma dayanımı değerleri için Tukey ortalama karşılaştırma analizi	102
Çizelge 4.29: 18-18-18 mm katman kalınlığına sahip ÇLK'lar için elastikiyet modülü ile dinamik elastikiyet modülü karşılaştırması.....	104
Çizelge 4.30: 18-18-18 mm katman kalınlığına sahip ÇLK'lar için elastikiyet modülü ile dinamik elastikiyet modülü karşılaştırması.....	105
Çizelge 4.31: 20-14-20 mm katman kalınlığına sahip ÇLK'lar için elastikiyet modülü ile dinamik elastikiyet modülü karşılaştırması.....	106
Çizelge 4.32: Deneysel ve numerik eğilme direnci karşılaştırması.....	108

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Bazı yapı malzemelerinin karbon emisyon ve depolama oranları (VTT, ECO2 Projesi).	2
Şekil 2.1: Gökmar'ın Türkiye'deki yayılış alanları (OGM-2014).	13
Şekil 3.1: Katmanlarda kullanılan odun türü ve katman kalınlığı parametreleri.	50
Şekil 3.2: ÇLK'ların hazırlanma süreci.	51
Şekil 3.3: 54 x 400 x 1100 mm ÇLK'ların preslenmesi.	51
Şekil 3.4: Malzemelerin eğilme özellikleri için deney düzenekleri a. Masif- 3 nokta eğme ve b. ÇLK- 4 nokta eğme.	53
Şekil 3.5: Kayma modülü tayini için deney düzeneği.	54
Şekil 3.6: a. 54x70x216 mm ve b. 15x54x60 mm ÇLK örnekleri.	56
Şekil 3.7: ÇLK basma deneyi düzeneği.	56
Şekil 3.8: a. 6 × 70 mm vida çekme örneği, b. Vida çekme test düzeneği, c. 7 × 100 mm vidalama ile hazırlanan örnekler ve d. 7 × 100 mm vida ile 3 katman penetre vidalama örnekleri.	57
Şekil 3.9: a. Çekmede makaslama örneklerin tutkallanması, b. Örneklerin preslenmesi, c. Örnek boyutu ve d. Deney düzeneği.	58
Şekil 3.10: ÇLK örneklerinin tahribatsız muayene ölçümleri a/b. Üst yüzey noktası, c/d. Enine kesit orta noktası.	59
Şekil 3.11: ÇLK örneklerinin tahribatsız muayene ölçümleri: e/f. alt yüzey noktası g/h. alt ve üst yüzey noktası diyagonal ve i/i. yanal diyagonal ölçümler. .	60
Şekil 3.12: ANYSY APDL a. 18-18-18 mm katmalar için modelleme, b. 18-18-18 mm katmanlar için mesh atama, c. 20-14-20 mm katmanlar için modelleme ve d. 20-14-20 katmanlar için mesh atama.	62
Şekil 3.13: ANSYS APDL'de sınır koşulları.	62
Şekil 4.1: Masif malzemelerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü.	67
Şekil 4.2: ÇLK malzemelerin eğilme direnci.	69
Şekil 4.3: Hibrit ÇLK malzemelerin eğilme direncinin gökmar ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	70
Şekil 4.4: Hibrit ÇLK malzemelerin eğilme direncinin ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	71
Şekil 4.5: ÇLK malzemelerin elastikiyet modülü.	73
Şekil 4.6: Hibrit ÇLK malzemelerin elastikiyet modülünün gökmar ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	74
Şekil 4.7: ÇLK malzemelerin elastikiyet modülünün ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	76
Şekil 4.8: ÇLK malzemelerin kayma modülü.	78
Şekil 4.9: Hibrit ÇLK malzemelerin kayma modülünün ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	79
Şekil 4.10: Hibrit ÇLK malzemelerin kayma ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	81
Şekil 4.11: ÇLK malzemelerin yuvarlama kesme dayanımı.	83

Şekil 4.12: Hibrit ÇLK malzemelerin yuvarlama kesme dayanımının göknar ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	84
Şekil 4.13: Hibrit ÇLK malzemelerin yuvarlama kesme dayanımının ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	85
Şekil 4.14: Masif malzemelerin basma dayanımı.	88
Şekil 4.15: ÇLK malzemelerin basma dayanımı.	90
Şekil 4.16: Hibrit ÇLK malzemelerin basma dayanımının göknar ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	91
Şekil 4.17: Hibrit ÇLK malzemelerin basma dayanımının ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	92
Şekil 4.18: Masif malzemelerin vida tutma kapasitesi.	94
Şekil 4.19: ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesi.	96
Şekil 4.20: Hibrit ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesinin göknar ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	97
Şekil 4.21: Hibrit ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesinin ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.	99
Şekil 4.22: Odun türlerinin bindirme kayma dayanımı	101
Şekil 4.23: ÇLK malzemelerin hafifliği	103
Şekil 4.24: Sonlu elemanlar analizi sonuçları	108
Şekil 4.25: Sonlu elemanlar analizi sonuçları	109

HİBRİT ÇAPRAZ LAMİNE KERESTELERİNİN DENEYSEL VE NUMERİK ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışma, farklı odun türleri ve katman kalınlıklarının hibrit çapraz lamine kereste (ÇLK) panellerin yapısal performansı üzerindeki etkilerini deneysel ve nümerik yöntemlerle incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmada, Uludağ göknarı, ladin ve kavak türleri kullanılarak homojen ve hibrit ÇLK konfigürasyonları oluşturulmuş; bu panellerin mekanik özellikleri detaylı olarak analiz edilmiştir.

Deneysel testler kapsamında eğilme direnci, elastikiyet modülü, kayma modülü, vida tutma kapasitesi, yuvarlanma kesme dayanımı, basma dayanımı ve bindirme kayma dayanımı gibi kritik parametreler ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, ladin odununun özellikle eğilme direnci, elastikiyet modülü, basma dayanımı ve vida tutma kapasitesi açısından diğer türlere kıyasla üstün performans sergilediğini ortaya koymuştur. Gök nar ve kavak odunları ise daha düşük yoğunluk ve mekanik özelliklere sahip olmakla birlikte, hibrit panellerde uygun kombinasyonlarla mekanik performans iyileştirilebilmiştir. Katman kalınlığı, özellikle dış katmanlarda kullanılan malzemenin kalınlığı, panellerin eğilme direnci ve kayma modülü gibi mekanik özelliklerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. 20 mm dış katman kalınlığına sahip paneller, 18 mm kalınlığa göre genellikle daha yüksek mekanik dayanım ve rijitlik değerleri sunmuştur.

Ayrıca, hibrit katman dizilimlerinin panellerin hafiflik ve mekanik performans açısından optimizasyonuna olanak sağladığı belirlenmiştir. Tahribatsız muayene yöntemiyle elde edilen dinamik elastikiyet modülü değerleri, homojen panellerde statik ölçümlerle yüksek uyum gösterirken, hibrit panellerde ölçüm noktaları arasındaki varyasyonun önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, farklı odun türlerinin mekanik uyumsuzluğu ve katman geçiş bölgelerinin dalga yayılımı üzerindeki etkisiyle açıklanmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan nümerik analizler, özellikle homojen 18-18-18 mm katman kalınlığına sahip panellerde deneysel sonuçlarla yüksek uyum göstermiştir. Ancak, 20-14-20 mm gibi asimetric kalınlığa sahip hibrit panellerde deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar belirgin şekilde artmıştır. Bu durum, nümerik modellerin malzeme heterojenliği, katman geçişleri ve yapısal asimetrisi tam anlamıyla yansıtamadığını göstermektedir.

Araştırma, hibrit ÇLK sistemlerinin yapısal performansını artırmak için uygun odun türü kombinasyonlarının ve katman kalınlıklarının seçilmesinin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, nümerik modellemelerde malzeme ve geometrik heterojenliklerin daha detaylı ele alınmasının gerekliliği ortaya konmuştur. Sonuç olarak, hibrit ÇLK paneller, sürdürülebilir ve verimli yapı malzemesi olarak ahşap yapı sektöründe geniş uygulama potansiyeli taşımaktadır.

Anahtar kelimeler: Hibrit çapraz lamine kereste, Mekanik özellikler, Sonlu elemanlar analizi, Tahribatsız muayene

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF HYBRID CROSS-LAMINATED TIMBER

SUMMARY

This study aims to investigate the effects of various wood species and layer thicknesses on the structural performance of hybrid cross-laminated timber (CLT) panels through experimental and numerical methods. In the research, both homogeneous and hybrid CLT configurations were prepared using Uludağ fir, spruce, and poplar species. The mechanical properties of these panels were thoroughly analyzed. Within the scope of the experimental tests, critical parameters such as bending strength, modulus of elasticity, shear modulus, screw withdrawal resistance, rolling shear strength, compressive strength, and lap shear strength were measured.

The results revealed that spruce exhibited superior performance, particularly in terms of bending strength, modulus of elasticity, compressive strength, and screw-holding capacity compared to the other species. Although fir and poplar presented lower density and mechanical properties, suitable combinations in hybrid panels allowed for significant improvements in mechanical performance. Layer thickness—especially that of the outer layers—played a decisive role in mechanical characteristics such as bending resistance and shear modulus. Panels with 20 mm outer layer thickness generally demonstrated higher mechanical strength and stiffness than those with 18 mm thickness.

Furthermore, it was determined that hybrid layer configurations enabled optimization in terms of lightweight design and mechanical performance. The dynamic modulus of elasticity values obtained through non-destructive testing showed high agreement with static measurements in homogeneous panels, whereas in hybrid panels, the variation between measurement points significantly increased. This phenomenon is explained by the mechanical incompatibility of different wood species and the effect of interlayer transitions on wave propagation.

Numerical analyses performed using the finite element method showed strong agreement with experimental results, particularly in homogeneous panels with 18-18-18 mm layer thickness. However, in asymmetric hybrid panels with thicknesses such as 20-14-20 mm, discrepancies between experimental and numerical results became more pronounced. This indicates that numerical models cannot fully reflect material heterogeneity, layer transitions, and structural asymmetries.

The research emphasizes the importance of selecting appropriate wood species combinations and layer thicknesses to enhance the structural performance of hybrid CLT systems. Furthermore, it highlights the necessity of more detailed consideration of material and geometric heterogeneities in numerical modeling. In conclusion, hybrid CLT panels possess high potential for widespread application in the timber construction sector as sustainable and efficient structural materials.

Keywords: Hybrid cross-laminated timber, Mechanical properties, Finite element analysis, Non-destructive testing



1. GİRİŞ

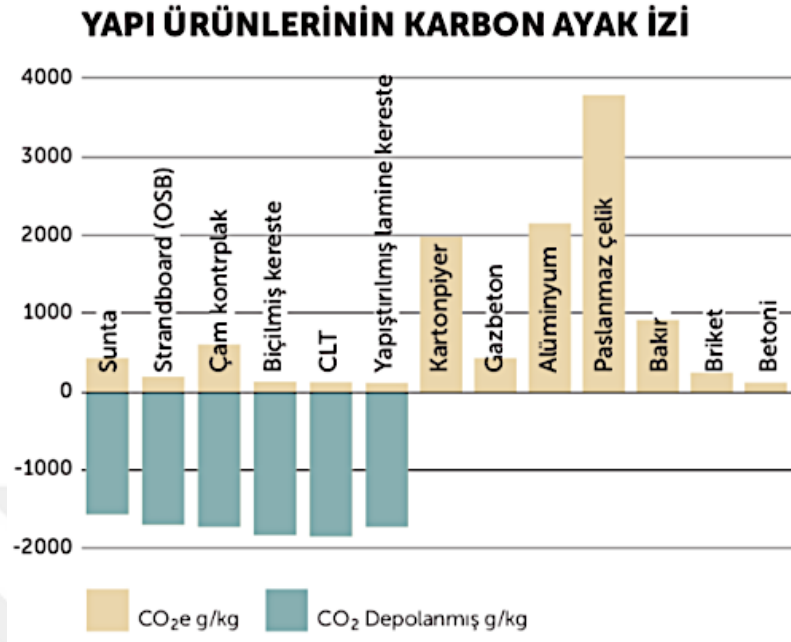
Ahşap, tarih boyunca yapı malzemesi olarak kullanılan ve günümüzde de modern yapı teknolojilerinde yaygın biçimde tercih edilen doğal bir malzemedir. Yenilenebilir bir kaynak olması, estetik ve çevre dostu özellikleri ile diğer yapı malzemelerine göre önemli avantajlar sunar. Günümüzde ahşap malzemeler, doğal masif ağaç ürünlerinden başlayarak lamine edilmiş, çapraz lamine kereste (ÇLK) ve LVL (lamine veneer lumber) gibi mühendislik ürünlerine kadar çeşitlenmiştir. Bu mühendislik ahşapları, doğal ahşabın mekanik ve dayanıklılık açısından bazı sınırlamalarını aşmak için geliştirilmiştir. Ahşabın kullanım alanları konut yapılarından çok katlı ofis binalarına, köprülerden spor salonlarına kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır (Korkut, 2020).

Ahşap, insanoğlu tarafından yüzyıllardır kullanılan en eski ve çevre dostu yapı malzemelerinden biridir. Geleneksel ahşap malzemelerinin modern yapı teknolojileriyle entegrasyonu hem malzeme performansını artırmakta hem de sürdürülebilir inşaat uygulamalarına katkı sağlamaktadır. Sürdürülebilir inşaat uygulamalarına yönelik artan talep, çapraz lamine kereste (ÇLK) malzemesini modern yapı malzemeleri arasında ön plana çıkarmıştır. Çok yönlü bir mühendislik ürünü olan ÇLK, özellikle karbon tutma kapasitesi ve çevresel etkisinin düşüklüğü açısından beton ve çelik gibi geleneksel malzemelere göre önemli avantajlar sunmaktadır (İlgin ve diğ., 2023).

Finlandiya VTT Teknik Araştırma Merkezi tarafından yürütülen ECO2 projesine göre, yapı ürünlerinin karbon ayak izleri karşılaştırıldığında ahşap kökenli malzemelerin hem düşük CO₂ salımı hem de yüksek karbon depolama kapasitesi sayesinde çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunduğu görülmektedir. Özellikle CLT (çapraz lamine kereste), biçimlik kereste ve sunta gibi ürünler, atmosfere salınan karbon miktarından daha fazlasını bünyelerinde depolayarak negatif karbon ayak izine ulaşabilmektedir (VTT, ECO2 Projesi).

Bu bağlamda, ÇLK yapı sektöründe yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmış ve özellikle çok katlı yapıların tasarımında yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak,

geleneksel ÇLK panellerin sınırlı mekanik dayanımı ve çevresel faktörlere duyarlılığı, hibrit çözüm arayışlarının doğmasına neden olmuştur.



Şekil 1.1: Bazı yapı malzemelerinin karbon emisyon ve depolama oranları (VTT, ECO2 Projesi).

Hibrit ÇLK ise, farklı ağaç türleri veya malzemelerin entegrasyonu yoluyla bu avantajları daha da ileriye taşıyarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesini ve çeşitli uygulamalara uyum sağlanmasını mümkün kılmaktadır (Rahman ve diğ., 2020). Bu hibrit yapımlar, geleneksel ÇLK'nin eksikliklerini gidermek, yapısal dayanıklılığını artırmak ve çevresel şartlara karşı daha dirençli hale getirmek amacıyla geliştirilmiştir. Çalışmanın hem deneysel hem de numerik analizlere odaklanması, hibrit ÇLK'nin tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve yapısal performansının optimize edilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

Hibrit ÇLK'nin ortaya çıkışı, geleneksel ÇLK yapılarında karşılaşılan eğilme rijitliği ve yuvarlanma kesme performansı gibi sınırlılıkların giderilmesi gerekliliğinden kaynaklanmaktadır (İlgın ve Karjalainen, 2023). Yapılan araştırmalar, özellikle daha yüksek yuvarlanma kesme modülüne sahip ağaç türlerinin kullanıldığı hibrit konfigürasyonların belirli yükleme koşullarında daha iyi yapısal performans sağlayabileceğini göstermektedir (Rahman ve diğ., 2020). Bu uyarlanabilirlik, yalnızca yapıların yapısal dayanıklılığını artırmakla kalmamakta, aynı zamanda yapı ağırlığını ve malzeme tüketimini azaltarak inşaat süreçlerini daha verimli hale getirmektedir (Tsai ve Lin, 2021). Ayrıca çalışmalar, hibrit ÇLK sistemlerinin enerji

verimliliği açısından da üstün performans sergileyebileceğini ve üretim aşamasında geleneksel betonarme yapılara kıyasla daha düşük enerji tüketimi ve emisyonu sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Tsai ve Lin, 2021; Salonvaara ve Desjarlais, 2024).

Dünya genelinde şehirler, alan kısıtlamaları ve çevresel sürdürülebilirlik gibi zorluklarla mücadele ederken, hibrit ÇLK, çoklu ihtiyacı karşılayan yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. ÇLK'nin çelik gibi malzemelerle entegrasyonu, daha yüksek ve karmaşık yapıların inşasına olanak tanıyan yapısal kapasiteyi artırmakta; böylece estetik ve işlevsel mimari talepler karşılanabilmektedir (Das ve diğ., 2025). Ayrıca, hibrit ÇLK ile gerçekleştirilebilecek modüler inşaat stratejileri, kent ortamlarında hızlı montaj ve uyarlanabilirliği destekleyerek dirençli ve sürdürülebilir kentleşmeye katkıda bulunmaktadır (Neve, 2019).

Bununla birlikte, tüm vaatlerine rağmen, hibrit ÇLK'nin yaygın kullanımı bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Bu zorluklar arasında, farklı koşullar altında kapsamlı performans değerlendirmelerine duyulan ihtiyaç ve standartlaşmış yapı yönetmeliklerinin geliştirilmesi yer almaktadır (Salonvaara ve Desjarlais, 2024). Bu sorunların ele alınmasıyla birlikte, inşaat sektörü hibrit ÇLK teknolojilerinden maksimum düzeyde faydalanabilecek ve çevresel duyarlılığı yüksek yeni bir yapı malzemesi çağının kapısını aralayabilecektir.

Ahşap malzemelerin geleneksel kullanımlarının dışında, hibrit ÇLK teknolojisinin geliştirilmesiyle yapısal elemanların hafiflik, mukavemet ve estetik gibi özellikleri daha üst seviyelere taşınabilmektedir. Özellikle çevre dostu malzemeler konusunda artan talepler, hibrit ÇLK'nin yapı endüstrisindeki popülaritesini daha da artırmıştır. Bunun yanı sıra, farklı malzeme kombinasyonlarıyla hibrit ÇLK panellerin üretim süreçleri üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

Sonuç olarak, hibrit çapraz lamine ahşap, yapı malzemesi biliminin sürdürülebilirlik, performans ve yenilik ekseninde bulunduğu noktayı temsil etmektedir. Bu teknolojinin gelişimi, yalnızca çevresel sorumluluk çabalarına katkıda bulunmakla kalmayıp, aynı zamanda modern mimarinin yapısal ve ekonomik taleplerine de cevap vermektedir. Araştırmalar ilerledikçe, hibrit ÇLK'nin evrimi yapı uygulamalarını önemli ölçüde etkileyecek ve sürdürülebilir yapıların geleceğini şekillendirecektir.

1.1 Ahşabın Yapısal ve Fiziksel Özellikleri

Ahşap malzemenin temel özellikleri, mikro yapısına ve özellikle hücresel yapısına bağlıdır. Ahşap, liflerden ve boşluklu hücrelerden oluşan bir kompozit malzeme olup, nem oranındaki değişikliklere oldukça duyarlıdır. Nem içeriği arttıkça ahşabın boyutsal kararlılığı azalır ve bu da yapısal deformasyonlara yol açabilir. Ahşabın lif yönündeki taşıma kapasitesi, liflere dik yöndeki kapasitesinden birkaç kat daha yüksektir. Bu durum, mühendislik tasarımlarında lif yönünün önemini artırmaktadır. Ayrıca, ahşabın elastikiyet modülü, yoğunluk ve türüne göre değişkenlik göstermektedir. Türkiye’de yaygın olarak kullanılan türler arasında karaçam (*Pinus nigra*), sarıçam (*Pinus sylvestris*) ve kayın (*Fagus orientalis*) bulunmaktadır (Çavuş ve diğ., 2024).

Ahşabın dayanıklılığı üzerinde biyotik (mantar, böcek) ve abiyotik (nem, sıcaklık, UV ışınları) faktörlerin olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle ahşap malzemelerin uzun ömürlü kullanımı için emprenye ve yüzey koruma uygulamaları gereklidir. Emprenye işlemleri ile ahşabın rutubete, mantara ve böcek saldırılarına karşı direnci artırılırken, yüzey kaplamaları UV ışınlarının zararlı etkilerini azaltmaktadır (Yıldız, 2018).

1.2 ÇLK ve Özellikleri

ÇLK, farklı yönlerde yerleştirilmiş ahşap katmanlarının birbirine yapıştırılmasıyla oluşturulan bir yapı malzemesidir. Katmanların en az üç olmak üzere birbirine dik açıyla yerleştirilmesi, ÇLK’nin boyutsal stabilitesini ve mekanik dayanımını önemli ölçüde artırır. Bu yapı sayesinde panel, yatay ve düşey yükler karşısında yüksek direnç gösterir. Ayrıca, ÇLK panellerin büyük boyutlarda üretilebilmesi, geniş açıklıklı ve yüksek katlı yapıların ahşapla inşasına olanak sağlar. Türkiye’de ve dünyada ÇLK sistemleri, yapı sektöründe hızlı montaj, hafiflik ve estetik avantajlarından dolayı giderek yaygınlaşmaktadır (Artun, 2021).

Mühendislik olarak geliştirilen bu paneller, yapısal performans açısından geleneksel masif ahşaba kıyasla üstünlükler taşır. Eğilme, kesme, basınç ve çekme dayanımı artırılmıştır. Bunun yanı sıra, farklı ahşap türlerinin katmanlarda kombinasyonu ile hem mekanik özellikler optimize edilmekte hem de maliyet avantajı sağlanmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, yerli türlerden üretilen ÇLK panellerin, yapıların

deprem ve rüzgâr yüklerine karşı yeterli performans gösterdiği ortaya konmuştur (Birinci ve diğ., 2021).

Çizelge 1.1 ÇLK paneller için bazı malzeme özellikleri (Swedish Wood, 2019)

Panel özellikleri	C14	C16	C24	C30
Karakteristik Mukavemet Değerleri (MPa)				
Eğilme dayanımı $f_{m,k}$	14	16	24	30
Lif yönünde çekme dayanımı $f_{t,0,k}$	7,2	8,5	14,5	19
Lif yönüne dik çekme dayanımı $f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4
Lif yönünde basınç dayanımı $f_{c,0,k}$	16	17	21	24
Lif yönüne dik basınç dayanımı $f_{c,90,k}$	2	2,2	2,5	2,7
Kesme dayanımı $f_{v,k}$	3	3,2	4	4
Rijitlik Değerleri (MPa)				
Ortalama elastikiyet modülü, lif yönünde $E_{m,0,ort}$	7000	8000	11000	12000
%5'lik elastikiyet modülü değeri, lif yönünde $E_{m,0,05}$	4700	5400	7400	8000
Ortalama elastikiyet modülü, lif yönüne dik $E_{m,90,ort}$	230	270	370	400
Ortalama kayma modülü G_{ort}	440	500	690	750
Yoğunluk (kg/m³)				
%5'lik yoğunluk değeri ρ_k	290	310	350	380
Ortalama yoğunluk değeri ρ_{ort}	350	370	420	460

ÇLK malzemeler için bazı malzeme özellikleri Çizelge 1.1’de verilmiştir. ÇLK paneller, kullanım amacına bağlı olarak yapısal (taşıyıcı) ve yapısal olmayan (taşıyıcı olmayan) olarak sınıflandırılmaktadır. Yapısal ÇLK paneller, yapının taşıyıcı sistemine entegre edilen ve eğilme, basınç ile kesme gibi yükleri karşılayan elemanlar olup, EN 16351:2015+A1:2021 standardında belirtilen mekanik gereklilikleri sağlamalıdır. Ayrıca, Eurocode 5 (EN 1995) kapsamında belirtilen boyutlandırma ve performans kriterlerine uygun olarak tasarlanmalıdır. Bu tür paneller genellikle C24, C30 veya daha yüksek mukavemet sınıfındaki ahşap elemanlardan üretilmekte olup; dış duvarlar, taşıyıcı iç duvarlar, döşeme-tavan panelleri ve çatı sistemleri gibi kritik yapılarda kullanılmaktadır. Yapısal kullanım için gerekli olan teknik koşullar arasında CE işareti veya ETA (European Technical Assessment) belgelendirmesi ile yangın dayanımı, sismik performans ve dinamik yükler altındaki davranışa ilişkin testlerin başarıyla tamamlanması yer almaktadır (EN 16351, 2021; FPInnovations, 2020).

Öte yandan, yapısal olmayan ÇLK paneller, taşıyıcı özellik taşımayan ve daha çok mimari ya da iç mekân çözümlerinde kullanılan panellerdir. Bu panellerin birincil amacı estetik katkı sağlamak, alanları bölmek veya yüzey işlevi görmek olduğundan, mekanik dayanım performansı ikincil düzeydedir. Bu tür uygulamalarda çoğunlukla C14 – C18 gibi düşük mukavemet sınıfına sahip ahşaplar yeterli olmaktadır. Ayrıca, bu paneller için CE belgelendirmesi zorunlu olmayıp, yangın dayanımı veya sismik testler gibi performans değerlendirmeleri yapılmadan da kullanılabilir. Yapısal olmayan CLT; bölme duvarlar, tavan kaplamaları, iç dekoratif yüzeyler ve akustik paneller gibi alanlarda tercih edilmektedir.

1.3 Ahşap Malzemelerin Çevresel ve Sürdürülebilirlik Açısından Önemi

Günümüzde sürdürülebilirlik ve çevre koruma bilincinin artması ile birlikte, yapı malzemelerinin çevresel etkileri önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Ahşap, karbon depolama kapasitesi sayesinde diğer yapı malzemelerine kıyasla karbon ayak izini azaltan bir malzemedir. Yaşam döngüsü analizleri, ahşap yapıların üretim, kullanım ve imha aşamalarında beton ve çeliğe kıyasla daha düşük sera gazı emisyonuna sebep olduğunu göstermektedir. Bu nedenle ahşap, düşük enerji tüketimi, yenilenebilir kaynak olması ve karbon depolama avantajları nedeniyle sürdürülebilir mimaride öncelikli olarak tercih edilmektedir (Yılmaz ve Koç, 2019).

Ayrıca, ahşabın üretim sürecinde daha az enerji harcanması, malzemenin genel çevresel etkinliğini artırmaktadır. Ahşap yapıların demontaj ve geri dönüşüm süreçlerinin diğer yapı malzemelerine göre daha kolay olması, sürdürülebilir yapı döngüsüne katkı sağlamaktadır. Tüm bu avantajlar, modern mimaride çevreci ve enerji verimli çözümlerin geliştirilmesinde ahşabın öncülüğünü desteklemektedir (Korkut, 2020).

1.4 Ahşabın Korunması ve İşlenmesi

Ahşabın uzun ömürlü ve dayanıklı olması için çeşitli koruyucu işlemler uygulanmaktadır. Isıl işlem (termal modifikasyon), emprenye, yüzey kaplamaları ve kimyasal işlemler ahşabın nem ve biyotik faktörlere karşı direncini artırır. Isıl işlem görmüş ahşap, yapısal stabilitesi artarken mekanik özelliklerinde de iyileşme sağlar. Ayrıca, ısıl işlem gören ahşaplarda biyolojik bozulmalara karşı direnç yüksektir. Bu sebeple ÇLK üretiminde ısıl işlemli ahşap kullanımı, malzemenin performansını artıran önemli bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Özen, 2017).

Emprenye işlemleri ise ahşap liflerine zararlı organizmaların nüfuz etmesini engelleyen kimyasal maddelerin ahşaba uygulanmasıdır. Bu sayede, ahşap yapı elemanlarının dayanıklılık süresi uzatılmaktadır. Yüzey kaplamaları ise dış etkenlere karşı bariyer oluşturur ve estetik görünümü destekler. Bu yöntemler hem doğal ahşap hem de mühendislik ahşaplarının dayanıklılığını artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Yıldız, 2018).

1.5 Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal bir yöntem olup, özellikle farklı malzeme özelliklerine ve düzensiz geometrilere sahip sistemlerin davranışlarının incelenmesinde etkin bir araçtır. Yapısal mühendislikte yaygın olarak kullanılan bu yöntem, yapının küçük ve sonlu elemanlara bölünmesi esasına dayanmakta; her bir elemanın malzeme özellikleri, yükleme koşulları ve sınır şartları ayrı ayrı tanımlanarak tüm sistemin davranışı hesaplanmaktadır. SEA sayesinde hem lineer hem de nonlineer analizler gerçekleştirilebilmekte; malzeme anizotropisi, geometrik karmaşıklıklar ve bağlantı detayları sayısal ortamda modellenabilmektedir. Özellikle ahşap-beton

hibrit sistemler gibi farklı malzemelerin bir arada kullanıldığı yapılarda, deneysel yöntemlerle elde edilmesi güç olan gerilme dağılımları, deplasman profilleri ve hasar gelişimleri SEA ile yüksek doğrulukla öngörülebilmektedir. (Cook ve diğ., 2007; Bathe, 2014).

ÇLK paneller, ortotropik yapıya sahip olmaları nedeniyle lif yönüne bağlı olarak farklı mekanik özellikler sergilemektedir. Literatürde ve Eurocode 5 (EN 1995) gibi uluslararası standartlarda belirtildiği üzere, yapısal kullanım için ortalama yoğunluk 450–550 kg/m³ arasında değişmektedir. Elastikiyet modülü lif yönüne paralel doğrultuda 11.000–14.000 MPa aralığında iken, teğet ve radyal doğrultularda bu değer 350–600 MPa seviyelerine düşmektedir. Benzer şekilde, kesme modülü lif yönüne dik düzlemlerde 50–70 MPa gibi düşük değerlerde iken, lif yönüne bağlı kesme modülleri 650–750 MPa aralığında ölçülmektedir. Basınç dayanımı paralel lif yönünde 24–35 MPa arasında olup, dik doğrultularda 3–5 MPa seviyelerine gerilemektedir. Çekme dayanımı lif yönüne paralel doğrultuda 12–15 MPa iken, dik doğrultularda 0.5–1 MPa gibi oldukça düşük değerlere sahiptir. Eğilme dayanımı ise genellikle paralel lif yönünde belirleyici olup 25–35 MPa aralığında raporlanmaktadır. Malzemenin Poisson oranı paralel-teğet ve paralel-radyal yönler için ortalama 0.35, teğet-radyal yönler için ise 0.45 civarındadır. Ayrıca ÇLK'nin higroskopik yapısı nedeniyle mekanik özellikleri nem oranından önemli ölçüde etkilenmekte olup, yapısal kullanımda denge nem oranı genellikle %8–12 aralığında kabul edilmektedir (EN 1995-1-1, 2004; Brandner ve diğ., 2016).

1.6 Kullanılan Ağaç Türleri ve Özellikleri

Bu çalışmada, masif Uludağ Göknaarı (*Abies bornmülleriana* Mattf), Ladin (*Picea Orientalis*) ve Kanada Kavağı (*Populus X canadensis* Moench) kullanılmıştır.

1.6.1 Uludağ göknarı (*Abies bornmülleriana* mattf)

Aşağıda Uludağ Göknaarının etimolojisi, morfolojik özellikleri, ekolojik özellikleri, Türkiye'deki yayılış alanları, fiziksel ve mekaniksel özelliklerinden bahsedilmiştir.

1.6.1.1 Etimolojisi

Uludağ göknarı (*Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana*), Türkiye'ye özgü bir göknar alt türüdür ve özellikle Uludağ bölgesinde yayılım gösterir. Bu ağaç türü,

bölgesel adı ve bilimsel tanımlamasıyla hem ekolojik hem de kültürel anlam taşımaktadır.

Göknar cinsinin bilimsel adı olan *Abies*, Latince “yükselen” anlamına gelir ve bu bağlamda cinsin uzunluğuna işaret etmektedir. *Abies* kelimesinin kökeni, eski Latince’de “yükselmek” veya “büyümek” anlamına gelen “*adipere*” fiilinden türetilmiştir. Bu etimolojik köken, göknar türlerinin uzun boylu ve görkemli yapılarıyla uyumludur. Bu bilginin kaynağı, literatürde genellikle botanikçilerin açıklamalarına dayandırılmaktadır (OGM, 2020).

Uludağ göknarının bilimsel adı *Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana* şeklindedir. *Abies nordmanniana* türü, ilk olarak Alman botanikçi Carl Heinrich Nordmann tarafından tanımlanmıştır. Nordmann, 19. yüzyılda, özellikle Karadeniz ve Anadolu bölgelerindeki ormanlar üzerinde yaptığı araştırmalar sonucunda bu türü bilime kazandırmıştır. Türün adı, Nordmann’ın çalışmalarına atfen verilmiştir. Bununla birlikte, subsp. *bornmulleriana* alt tür adı, Türk botanikçisi Bornmüller’a onur olarak eklenmiştir. Bu etimolojik adlandırma hem bir yerel araştırmacıya hem de türün yayılım alanlarına dair bilgi sunar.

Türkçe’de bu ağaç türüne genellikle “göknar” denir, fakat bazen farklı bölgelerde bu ağacın adı “Uludağ göknarı” veya “Karadeniz göknarı” olarak da kullanılmaktadır. Bu isimlendirme, türün Türkiye’nin en yüksek dağı olan Uludağ’a özgü olmasından kaynaklanmaktadır. Uludağ göknarının coğrafi dağılımı ve ekolojik özellikleri, bu ismin seçilmesinde önemli bir faktördür. Ayrıca, *Abies nordmanniana* türünün başka yerlerde de yaygın olmasına rağmen, Uludağ’a ait özel formu bilimsel bir şekilde ayrılmaktadır.

Bir başka önemli detay ise, *Abies nordmanniana* türünün adının, Alexander von Nordmann onuruna verildiği ve “Nordmann” adının, Türkçe’de sıkça yanlış anlaşılabilen bir isim olduğu gerçeğidir. Nordmann, Finlandiyalı bir botanikçidir ve adlandırmadaki bu kelime, doğrudan bir coğrafi bölgeye değil, bilimsel keşfe dayanır. (OGM, 2020)

Uludağ göknarının etimolojisi, bilimsel adlandırma ve bölgesel isimlendirmeler açısından önemli bir kültürel ve botanik zenginlik taşır. Bu ağaç türü, bilimsel adlandırmanın ve halk arasında kullanılan isimlerin ötesinde, Türk ormanlarının ve ekosisteminin simgelerinden biri haline gelmiştir. *Abies nordmanniana* subsp.

bornmulleriana adı hem botanik hem de yerel anlamda derin kökenlere sahip olup hem biyolojik çeşitliliği hem de bölgesel tanımayı yansıtan bir unsurdur.

1.6.1.2 Morfolojik özellikleri

Uludağ göknarı (*Abies nordmanniana subsp. bornmulleriana*), Türkiye'ye özgü ve oldukça değerli bir orman türüdür.

Uludağ göknarı, yüksek boylu bir ağaç türüdür. Yetişkin bir Uludağ göknarı, genellikle 40-50 metreye kadar boylanabilir, ancak bazı bireyler 60 metreye kadar ulaşabilir. Gövdesi dik ve silindirik olup, genellikle düz ve ince kabuğa sahiptir. Büyüme hızları orta seviyededir ve yıllık olarak 30-50 cm arasında boylanabilirler. Bu ağaçlar, uzun yıllar boyunca büyüdükçe kalınlaşarak geniş ve güçlü bir gövdeye sahip olur. Gövde çapı 1-1,5 metreyi bulabilir. OGM (2020) bu ağaç türünü, "yüksek boylu ve görkemli ağaçlar" olarak tanımlamaktadır.

Uludağ göknarının yaprakları, iğne şeklinde, uzun ve düz olup, 1,5-3 cm genişliğinde ve 2-3 cm uzunluğundadır. Yapraklar, genellikle iğne formunda olup, üst yüzeyleri koyu yeşil, alt yüzeyleri ise açık yeşil renkte olur. Yaprakların her iki yüzeyi, küçük hava boşlukları (stoma) içerir ve bu da su buharı alışverişini düzenler. Yapraklar daima üzeri düz ve sert dokuludur, bu da onları çevresel faktörlere karşı dayanıklı hale getirir. Ayrıca, yaprakların uç kısımları hafifçe kavisli olabilir. OGM (2020) bu özelliği, "gövdeye paralel olarak uzun, sert ve ince yapraklar" olarak tanımlar.

Uludağ göknarının kozası, genellikle silindirik ve uzun olup, 12-20 cm arasında değişen uzunluklara sahiptir. Kozalar, ilk başta yeşil renkte olup, olgunlaştıkça kahverengi ve sertleşmiş bir yapıya bürünür. Olgunlaşan kozalarda, tohumlar yaklaşık 5-7 mm uzunluğunda ve ince kanatlıdır. Tohumlar, rüzgar yardımıyla yayılır ve bu şekilde yeni alanlarda göknarların çoğalması sağlanır. Tohumların rüzgarla yayılma özellikleri, *Abies nordmanniana* türü için önemli bir adaptasyon olarak tanımlanır (OGM, 2020). Tohumlar döküldükten sonra, genç fidanlar gövdeyi büyütme için hızla köklenirler.

Uludağ göknarının kök sistemi derin ve yayılmacıdır. Bu ağaç türü, köklerini genellikle 2-3 metre derinliğe kadar uzatabilir. Kökler, suyun ve besin maddelerinin bulunduğu derin toprak katmanlarına ulaşarak, ağacın su ve besin ihtiyacını karşılar. Ayrıca, köklerin geniş yüzeyi, ağaçların stabilize olmasını sağlar, bu da rüzgar gibi dış etkilere karşı dayanıklı olmalarını sağlar. OGM (2020), "kök sisteminin derin ve

yayılmacı yapısını" vurgulamaktadır, bu da ağacın zor iklim koşullarında hayatta kalabilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Uludağ göknarının morfolojik özellikleri, onu çevresindeki diğer ağaç türlerinden ayıran temel faktörlerdir. Uzun boyu, sağlam gövdesi ve dayanıklı yaprakları bu türü hem ekolojik hem de ekonomik açıdan önemli kılmaktadır. Ayrıca, kök yapısının derin ve yayılmacı olması, bu ağacın zorlu coğrafi koşullarda hayatta kalabilmesini sağlar.

1.6.1.3 Ekolojik özellikleri

Uludağ göknarı (*Abies nordmanniana subsp. bornmulleriana*), Türkiye'nin endemik ve önemli orman türlerinden biridir. Uludağ ve çevresindeki dağlık alanlarda yetişen bu tür, ekosistemdeki fonksiyonel rolü açısından büyük öneme sahiptir.

Uludağ göknarı, özellikle Uludağ ve çevresindeki dağlık alanlarda yayılım gösterir. Bu tür, genellikle 1.000-2.500 metre yükseklikler arasında bulunur ve bu yükseklik, türün soğuk iklimlere adaptasyonunu gösterir. OGM (2020)

Uludağ göknarı, nemli iklim koşullarını tercih eder ve yüksek rakımda, soğuk kış şartlarına dayanıklıdır OGM (2020).

Bu türün adaptasyonunu, "nemli ve soğuk iklimlere dayanan yapısı" olarak belirtmektedir. Uludağ göknarının yaprakları, kar örtüsünün yoğun olduğu alanlarda, karın etkisini azaltacak şekilde tasarlanmış olup, bu özellik türün soğuk iklim koşullarında hayatta kalmasına olanak tanır.

Uludağ göknarı, derin, besin açısından zengin ve iyi drene olan topraklarda yetişmeyi tercih eder. Bu ağaç türü, suyun bol olduğu yerlerde daha iyi gelişir ve su kaynağının yeterli olduğu ortamlarda büyüme hızları artar. Buna karşın, Uludağ göknarının kökleri, suyu emme kapasitesine göre toprakta geniş bir alana yayılabilir. Bu da ona, suyun dengesiz olduğu durumlarda bile hayatta kalma şansı tanır. Ayrıca, yüksek rakımda yer alan yerlerde toprak kalitesi, türün büyümesi için önemli bir faktördür ve genellikle asidik topraklarda daha iyi gelişir.

Uludağ göknarı, yaşadığı ekosistemde önemli bir rol oynar. Bu ağaç, yerel flora ve fauna için hem barınak hem de besin kaynağı sunar. Özellikle göknar kozalakları, kuşlar ve bazı memeliler için besin kaynağı oluşturur. Ayrıca, bu türün yaprakları ve odunu, bazı böcek türleri için besin sağlar. Uludağ göknarı, orman ekosisteminde diğer

ağaç türleriyle ve bitki örtüsüyle etkileşime girerek ekolojik dengenin sürdürülmesine katkıda bulunur. OGM (2020)

Uludağ göknarının ekolojik özellikleri, onun bu türün hayatta kalmasını ve başarılı bir şekilde çoğalmasını sağlayan birçok faktöre dayanır. Yüksek irtifalar, soğuk iklim koşulları, besin açısından zengin topraklar ve yüksek nem oranı gibi çevresel etkenler, bu ağacın başarılı bir şekilde yetişmesine olanak tanır. Ayrıca, Uludağ göknarı, ekosistemde önemli bir ekolojik rol oynar ve bu yüzden orman ekosisteminin denge ve biyolojik çeşitlilik açısından kritik bir unsuru haline gelir.

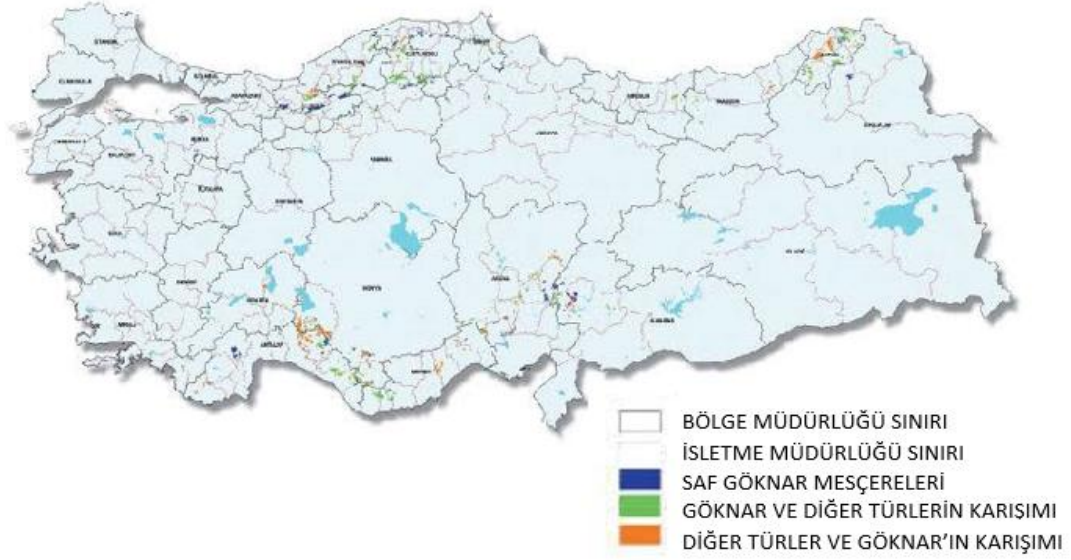
1.6.1.4 Ülkemizdeki yayılışı

Uludağ göknarı (*Abies nordmanniana subsp. bornmulleriana*), Türkiye'ye özgü bir göknar alt türüdür ve yalnızca belirli bölgelerde doğal yayılım gösterir. Türkiye'nin orman ekosisteminde önemli bir yere sahip olan bu tür, özellikle yüksek rakımlı ve soğuk iklim koşullarına uygun alanlarda görülür.

Uludağ göknarının doğal yayılım alanları, Batı ve Kuzeybatı Anadolu'nun yüksek dağlık bölgeleri ile sınırlıdır. Özellikle Uludağ (Bursa), Köroğlu Dağları (Bolu), Ilgaz Dağları (Kastamonu) ve Karadeniz Bölgesi'nin iç kesimlerinde yaygın olarak bulunur. Bu tür, 1.000 ile 2.500 metre rakımları arasında yetişir ve genellikle nemli, serin ve karasal iklimin hâkim olduğu bölgelerde varlık gösterir (OGM, 2020).

Bununla birlikte, Uludağ göknarının Türkiye'deki en belirgin yayılım alanlarından biri, adını da aldığı Uludağ'dır. Uludağ göknarı bu bölgede ormanın baskın ağacı olarak görülür ve diğer ağaç türleriyle birlikte geniş orman örtüleri oluşturur. OGM (2020), bu durumu "Uludağ ve çevresindeki karışık ormanlarda baskın türlerden biri olarak" tanımlamaktadır.

Uludağ göknarı, Karadeniz İklimi'ne benzer nemli ve serin hava koşullarına ihtiyaç duyar. Bu nedenle, yayılım alanları genellikle yıllık yağış miktarının yüksek olduğu bölgelerle örtüşür. Toprak özellikleri bakımından ise, bu türün derin, iyi drene edilmiş ve organik madde bakımından zengin topraklarda daha iyi geliştiği bilinmektedir. Özellikle Kastamonu ve Bolu ormanlarındaki yayılımı, bu bölgelerdeki toprak yapısıyla doğrudan ilişkilidir.



Şekil 1.2: Göknar'ın Türkiye'deki yayılış alanları (OGM-2014).

1.6.1.5 Uludağ Göknarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Uludağ göknarı (*Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana*), Türkiye'nin endemik ve değerli ağaç türlerinden biri olup, yapısal özellikleri sayesinde mobilya, yapı malzemesi ve kâğıt sanayi gibi farklı alanlarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Düşük yoğunluğu ve düzgün dokusu, işlenebilirliğini kolaylaştırarak ahşap ürünler için elverişli bir malzeme haline getirmektedir. Kurutulmuş Uludağ göknarının yoğunluğu genellikle $380\text{--}450\text{ kg/m}^3$ aralığında olup, bu özelliği sayesinde hafif bir malzeme olarak kolay taşınabilirlik ve işlenebilirlik sağlamaktadır (OGM, 2020). Kesim sonrasında yaklaşık %40–50 seviyelerinde olan nem içeriği, kurutma işlemleri sonucunda %8–12 aralığına düşmekte; bu durum odunun kuruma sürecinde minimal deformasyon göstermesine olanak tanımaktadır (Güler & Ateş, 2021). Açık sarımsı beyaz rengi, homojen renk dağılımı ve pürüzsüz dokusu, estetik uygulamalarda önemli bir avantaj sunmaktadır. Mekanik özellikleri açısından incelendiğinde; basınç dayanımının $30\text{--}35\text{ N/mm}^2$, eğilme dayanımının $60\text{--}70\text{ N/mm}^2$, elastikiyet modülünün $9.000\text{--}11.000\text{ N/mm}^2$ ve liflere paralel çekme dayanımının $40\text{--}50\text{ N/mm}^2$ aralığında olduğu görülmektedir. Bu değerler, Uludağ göknarının hem mobilya üretiminde hem de yapı malzemesi olarak kullanımında güvenilir ve ekonomik bir seçenek olmasını sağlamaktadır (OGM, 2020; Güler & Ateş, 2021).

1.6.1.6 Endüstriyel kullanım alanları

Uludağ göknarı, sahip olduğu fiziksel ve mekaniksel özellikleri sayesinde birçok endüstriyel kullanım alanında tercih edilen değerli bir türdür. Hafif yapısı ve kolay işlenebilirliği, onu mobilya üretiminde öne çıkarırken; uzun ve homojen lif yapısı, kâğıt sanayi için ideal bir hammadde niteliği taşımaktadır. Ayrıca eğilme dayanımı ve elastikiyet özellikleri sayesinde yapı sektöründe kiriş ve çatı elemanı olarak kullanım imkânı bulmaktadır. Bu nitelikler, Uludağ göknarının ekonomik ve endüstriyel değerini artırmakta; düşük yoğunluğu, yüksek işlenebilirliği ve tatmin edici mekanik dayanımı ile ahşap ürünlerde ve yapı elemanlarında ideal bir malzeme haline gelmesini sağlamaktadır. Ancak bu avantajların sürdürülebilir şekilde değerlendirilebilmesi için, uygun kurutma ve işleme tekniklerinin titizlikle uygulanması gerekmektedir.

1.6.2 Ladin (*Picea orientalis*)

Aşağıda Ladinin etimolojisi, morfolojik özellikleri, ekolojik özellikleri, Türkiye'deki yayılış alanları, fiziksel ve mekaniksel özelliklerinden bahsedilmiştir.

1.6.2.1 Etimolojisi

Ladin ağacı (*Picea*), kozalaklı ağaçlar familyasına (*Pinaceae*) ait bir cins olup, Kuzey Yarımküre'nin soğuk ve ılıman bölgelerinde yaygın olarak bulunur. Ladin, özellikle inşaat, kâğıt üretimi ve mobilya gibi farklı endüstrilerde kullanılmaktadır. Ancak, bu ağacın adı olan "ladin" kelimesinin kökeni, kültürel ve dilbilimsel bir perspektiften de dikkat çekicidir.

Ladin kelimesinin kökeni üzerine yapılan araştırmalar, bu terimin kökeninin birkaç farklı dilden etkilenmiş olabileceğini göstermektedir. Türkçede kullanılan "ladin" kelimesinin, Eski Slav dillerindeki "jedlb" kelimesinden türemiş olabileceği öne sürülmektedir. Bu kelime, "yenilebilir" anlamına gelir ve Slav halklarının ladin ağacının yenilebilir bazı kısımlarını tüketmiş olabileceğine işaret eder (Smith, 2003).

Diğer bir görüş ise "ladin" kelimesinin, Latince kökenli "ladanum" kelimesiyle ilişkili olabileceğini öne sürmektedir. Ladanum, aromatik bir bitki reçinesi olup, tarih boyunca şifa ve koku amaçlı kullanılmıştır. Bu bağlamda, ladin ağaçlarının reçinelerinin benzer bir kullanım alanına sahip olması, bu etimolojik bağın kurulmasına neden olmuştur (Jones ve Miller, 2015).

Avrupa'da ise ladin kelimesinin kökeni, Almanca "Lärche" kelimesi ile ilişkilendirilebilir. Ancak, bu kelimenin daha çok "larix" türü ağaçları tanımladığı ve "ladin" terimiyle doğrudan bir bağlantısı olmadığı belirtilmelidir. Bu durum, farklı dillerde aynı veya benzer kavramların nasıl farklı kelimelerle ifade edildiğini anlamak açısından önemlidir.

Ladin kelimesinin etimolojisi, tarihsel, kültürel ve dilbilimsel bir bakış açısıyla ele alındığında oldukça zengin ve çok katmanlı bir yapı sergilemektedir. Slav dillerinden Latinceye, Türk kültüründen Avrupa dillerine kadar uzanan bu yolculuk, doğa ile dil arasındaki ilişkiyi anlamak için eşsiz bir örnek sunmaktadır.

1.6.2.2 Morfolojisi

Ladin ağacı, morfolojik açıdan dikkat çekici özelliklere sahip bir türdür. Genellikle 20-60 metre arasında değişen boylarıyla öne çıkan ladin, konik ve simetrik bir taç yapısına sahiptir. Ağaç, ince ve pürüzsüz bir kabuğa sahipken yaşlandıkça kabuk kalınlaşıp çatlaklı bir görünüm kazanır (Brown, 2018).

Ladin ağacının iğne yaprakları dört köşeli ve sert bir yapıya sahiptir. Bu yapraklar genellikle koyu yeşil renkte olup, her biri tek tek dallara bağlıdır. Yapraklar, 5-10 yıl boyunca ağaç üzerinde kalır ve bu, ağacın sürekli yeşil kalmasını sağlar (Carter ve Evans, 2020).

Ladin ağaçları, özellikle kozalaklarıyla tanınır. Bu kozalaklar, genellikle silindirik bir yapıya sahiptir ve 10-15 cm uzunluğunda olabilir. Kozalaklar, olgunlaştıklarında yere düşerek tohumların yayılmasını sağlar. Ladin tohumları, küçük ve kanatlı yapıları sayesinde rüzgarla taşınarak geniş bir alana yayılabilir (Greenfield, 2016).

Ladin ağacının kök sistemi, genellikle sık bir yapıya sahiptir. Ancak bazı türlerde kökler, yanlara doğru genişleyerek ağacın rüzgâra karşı dayanıklılığını artırır. Bu durum, ladin ağaçlarının genellikle rüzgârlı ve dağlık bölgelerde bulunmasının bir nedeni olarak değerlendirilebilir (Yılmaz, 2010).

1.6.2.3 Ekolojik özellikleri

Ladin (*Picea spp.*), Kuzey Yarımküre'nin soğuk ve serin iklimlerinde yaygın olarak bulunan, kozalaklı (iğne yapraklı) bir ağaç türüdür. Genellikle orman ekosistemlerinde önemli bir rol oynar ve özellikle inşaat, kâğıt üretimi ve mobilya yapımı gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ladin türünün ekolojik özelliklerini

detaylı bir şekilde incelemek için habitat, toprak, iklim gereksinimleri ve ekosistem içindeki işlevleri gibi farklı yönleri odaklanabiliriz.

Ladin, genellikle Kuzey Amerika, Avrupa ve Asya'nın soğuk ve ılıman bölgelerinde doğal olarak yetişir. Türlerin yayılımı genellikle deniz seviyesinden başlayarak yüksek rakımlı dağlık alanlara kadar uzanır. Türkiye'de ise Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yaygın olarak yetişen Doğu Ladini (*Picea orientalis*) önemli bir türdür (Eryılmaz ve Şafak, 2019).

Ladin türleri genellikle iyi drene edilmiş, hafif asidik ve mineral açısından zengin toprakları tercih eder. Ancak bazı türler besin açısından fakir topraklarda da gelişebilir. Doğu Ladini, özellikle nemli ve organik maddece zengin topraklarda sağlıklı bir büyüme gösterir (Çepel, 1988).

Ladin, soğuk iklimlere oldukça dayanıklıdır. Özellikle yüksek rakımlarda sıkça karşılaşılan don olaylarına ve düşük sıcaklıklara karşı uyum sağlamıştır. Nemli hava koşullarını ve bol yağışlı ortamları tercih eder. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde görülen sürekli nem ve yağış, Doğu Ladini'nin yayılımını artıran önemli bir faktördür (Atalay, 1994).

Ladin ormanları, birçok canlı türüne barınak ve besin sağlar. Yaban hayatı için önemli bir habitat oluşturur; kuşlar, küçük memeliler ve böcekler ladin ormanlarını sıkça kullanır. Ayrıca ladin, orman ekosisteminde karbon tutulumunda ve toprak korumasında önemli bir rol oynar (Keleş ve Başkent, 2009).

Ladin, mobilya yapımı, kağıt üretimi ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılırken, aynı zamanda erozyon kontrolü ve su kaynaklarının korunmasında da önemli bir rol oynar. Ekolojik olarak, karbon yutakları oluşturması ve oksijen üretimiyle iklim değişikliğiyle mücadelede kritik öneme sahiptir. (Odum, 1971).

1.6.2.4 Türkiye'deki yayılımı

Türkiye'de doğal olarak yetişen en önemli ladin türü Doğu Ladini (*Picea orientalis*), Doğu Karadeniz Bölgesi'nin karakteristik ağaçlarından biridir. Tür, deniz seviyesinden başlayarak 2.200 metre rakıma kadar olan alanlarda yayılım gösterir ve genellikle nemli, yağışlı bölgelerde saf ya da karışık ormanlar oluşturur. Özellikle Trabzon, Rize, Artvin, Giresun ve Ordu illerinde yoğunlaşan bu tür, bölgenin

ekosistem dengesi açısından büyük önem taşır. “Doğu Karadeniz’in sürekli yağışlı ve nemli iklimi, Doğu Ladini için ideal bir yayılış ortamı sağlamıştır” (Atalay, 1994).

Doğu Ladini, Artvin’den başlayarak Rize, Trabzon, Giresun ve Ordu illerine kadar uzanan bir dağılım göstermektedir. Rakım yükseldikçe saf meşcereler oluşturma eğilimindedir. Özellikle Rize ve Artvin illeri, bu türün en yoğun yayılım alanlarıdır. “Türün en yoğun bulunduğu alanlar, yüksek rakımlı dağlık bölgeler olup, burada genellikle göknar ve sarıçam ile karışık meşcerelerde görülmektedir” (Atalay, 1994).

Doğu Ladini, endüstriyel alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle hafifliği, dayanıklılığı ve işlenebilirliği sayesinde inşaat, mobilya ve kâğıt endüstrilerinde önemli bir hammadde kaynağıdır. Ladin ağacı, ince taneli yapısı ve homojen dokusu sayesinde özellikle mobilya üretiminde ve iç mekân dekorasyonunda tercih edilir. Ayrıca, kâğıt üretiminde kullanılan ham maddelerden biridir, çünkü yüksek selüloz içeriğine sahiptir.

İnşaat sektöründe, ladin, dayanıklı ve hafif olduğundan yapı malzemesi olarak kullanılır, bu da özellikle prefabrik yapıların ve iç mekân dekorasyonunun üretiminde avantaj sağlar. “Ladin kerestesi, hafifliği ve işlenebilirliği ile özellikle mobilya ve iç mekân dekorasyonunda sıklıkla tercih edilmektedir” (Odum, 1971).

1.6.2.5 Fiziksel özellikler

Doğu Ladini, hafif ve yumuşak bir oduna sahip olup, bu özellikleri onu endüstriyel kullanımlar için çok değerli kılar. Ladin ağacının odunu açık sarıdan beyaz renge kadar değişir ve genellikle düz ve homojen bir dokuya sahiptir. Bu, ağacın işlenmesini kolaylaştıran önemli bir özelliktir. Ladin, su emme kapasitesine sahip olmakla birlikte, nem oranı genellikle %12 civarındadır. Bu nem oranı, odunun dayanıklılığına katkı sağlarken, aynı zamanda çevresel koşullara karşı gösterdiği dirençle de önemli bir avantaj sunar.

Ladin ağacının yoğunluğu genellikle 400-500 kg/m³ arasında değişir. Bu, onu oldukça hafif bir ağaç yapar ve taşıma, işleme ve kullanım açısından büyük kolaylık sağlar. Bunun yanı sıra, odunun sertlik değeri de orta seviyelerdedir. Ladin, özellikle iç mekân kullanımları için ideal bir malzemedir çünkü ısı iletkenliği düşüktür ve iyi bir yalıtım sağlar.

“Ladin odununun düşük yoğunluğu ve düzgün dokusu, işlenebilirlik açısından önemli bir avantaj sağlar ve hafifliği ile taşıma ve kullanım kolaylığı sunar” (Kaya, 2022).

1.6.2.6 Mekanik özellikler

Doğu Ladini'nin mekaniksel özellikleri, onu özellikle inşaat ve mobilya sektörlerinde kullanışlı kılar. Ladin odununun çekme dayanımı, genellikle 35-45 MPa aralığındadır ve bu da onu çekme kuvvetlerine karşı orta seviyede dayanıklı yapar. Ancak, eğilme dayanımı oldukça yüksektir ve bu, ladin kerestesinin özellikle inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak tercih edilmesinin başlıca nedenidir. Ladin, eğilme dayanımında yaklaşık 90-110 MPa'lık bir değere sahiptir. Bu da yapısal dayanıklılığını arttıran önemli bir özelliktir.

Ladin ağacının basınca dayanımı ise 40-60 MPa civarındadır. Bu özellik, onu mobilya üretimi ve inşaat sektöründe, özellikle orta büyüklükteki yük taşıyan yapısal uygulamalarda kullanıma uygun hale getirir. Ladin, ayrıca elastik modül açısından da oldukça iyi değerlere sahiptir ve bu, özellikle statik yük taşıyan yapısal elemanlarda önemli bir avantaj sağlar. Elastik modül, ladin odununda 9-12 GPa civarındadır, bu da yapı malzemesi olarak dayanıklılığını artırır.

Bunun yanı sıra, ladin odunu gerilme ve şekil değiştirme konusunda da oldukça elverişlidir, bu da onu şekillendirmenin kolay olduğu, estetik açıdan zengin ürünler yapmak için ideal bir malzeme yapar. Ladin kerestesi, işlenebilirlik açısından da üst düzeydir, bu da mobilya ve iç mekân dekorasyonunda geniş kullanım alanı bulmasına yol açar.

“Ladin odununun mekanik özellikleri, özellikle eğilme ve basınca dayanımı açısından oldukça güçlüdür. Ayrıca, elastik modülü yüksek olduğundan yapısal dayanıklılığı artırmaktadır” (Özdemir ve Akbaş, 2023).

1.6.3 Kanada kavağı (*Populus X canadensis moench*)

Aşağıda Ladinin etimolojisi, morfolojik özellikleri, ekolojik özellikleri, Türkiye'deki yayılış alanları, fiziksel ve mekaniksel özelliklerinden bahsedilmiştir.

1.6.3.1 Etimolojisi

Kanada kavağı, bilimsel adıyla *Populus × euramericana*, Avrupa kavakları (*Populus alba*) ile Amerika kavaklarının (*Populus deltoides*) melezleşmesi sonucu ortaya çıkan

bir kavak türüdür. Bu melezleşme, her iki türün özelliklerini bir araya getirerek hızlı büyüme ve dayanıklılık gibi avantajlar sunar (Ayrancı, 2023).

Türkçedeki "Kanada kavağı" terimi, bu ağacın adının bir parçası olarak, Kanada'nın adını taşır. "Kavak" ise, Türkçede "Populus" cinsini ifade eden bir bitki adıdır. Bu nedenle, "Kanada kavağı" terimi, Kanada kökenli bir kavak türünü tanımlar (Ayrancı, 2023).

Kavak kelimesinin kökeni, Orta Türkçe'de "kavak" anlamında kullanılan "kavak" sözcüğüne dayanır. Bu sözcük, Eski Türkçe'de "kabuk" anlamına gelen "kāv" kelimesinden türetilmiştir (Nişanyan, 2023).

1.6.3.2 Morfolojik özellikleri

Kanada kavağı, hızla büyüyen ve dik bir yapıya sahip olan bir ağaç türüdür. Yüksekliği 30 metreye kadar ulaşabilir ve genişliği 15-20 metreyi bulabilir. Gövdesi, düzgün ve silindirik olup, gri-beyaz renkte bir kabuğa sahiptir. Genç gövdelerde, kabuk pürüzlü olabilirken, yaşlandıkça daha düz ve düzgün hale gelir. Yaprakları, genellikle 6–10 cm uzunluğunda ve 5–7 cm genişliğinde, yuvarlak ya da dikdörtgen şeklinde olup, kenarları dişlidir. Üst yüzeyi parlak yeşil, alt yüzeyi ise hafif tüylüdür (Ayrancı, 2023).

Kanada kavağının çiçekleri, özellikle dişi çiçekler, sarkık bir şekilde kümelenir ve 4–6 cm uzunluğunda olurlar. Erkek çiçekler ise daha kısa ve dik bir yapıya sahiptir. Çiçekler, genellikle ilkbaharda açar ve tohumları rüzgarla taşınarak yayılır. Bu tür, köklerinden yeni sürgünler vererek, hızlı bir şekilde çoğalma yeteneğine sahiptir (Ayrancı, 2023).

Kavak ağacının odunu hafif, yumuşak ve kolay işlenebilir olup, genellikle kağıt, mobilya ve inşaat sektörlerinde kullanılır. Aynı zamanda, Kanada kavağı, hızlı büyüme hızına sahip olması nedeniyle orman üretiminde önemli bir yer tutar (Nişanyan, 2023).

1.6.3.3 Ekolojik özellikleri

Kanada kavağı (*Populus × euramericana*), hızla büyüyen ve çevresel koşullara kolay uyum sağlayabilen bir ağaç türüdür. Ekolojik özellikleri, bu türün yaşam alanı, su gereksinimleri ve toprak koşullarına duyarlılığını belirler.

Kanada kavağı, suyu seven bir ağaç türüdür ve gelişmesi için yüksek nemli ortamlara ihtiyaç duyar. Akarsu kenarlarında, sulak alanlarda ve nemli topraklarda en iyi gelişimi gösterir. Bu tür, köklerinden yeni sürgünler vererek su kaynaklarının bol olduğu yerlerde hızlı yayılabilir. Ancak, suyu çok az olan bölgelerde gelişimi zayıf olabilir (Karaçay, 2023).

Kanada kavağı, organik maddece zengin, iyi drene olan toprakları tercih eder. Bu ağaç türü, ağır, suyu geçirmeyen topraklarda verimli büyüme gösteremez. Toprağın asidik ya da alkali olması yerine nötr pH seviyelerinde en iyi şekilde gelişir. Bu nedenle, su tutma kapasitesi yüksek ve hafif asidik topraklar onun için ideal yaşam alanlarıdır (Ayrancı, 2023).

Kanada kavağı, ışık ağaçları arasında yer alır. Işığın bol olduğu ortamlarda hızlı büyür. Yetişkin ağaçlar, orman açıklıklarında ya da orman kenarlarında daha iyi gelişir. Gövdesinin düzgün ve silindirik yapısı, bu ağacın güneş ışığından daha fazla faydalanmasını sağlar. Bu durum, onu orman yönetimi ve ağaçlandırma çalışmalarında tercih edilen bir tür yapar (Karaçay, 2023).

Kanada kavağı, ılıman iklim koşullarına uyum sağlamış bir türdür. Kış soğuklarına dayanıklı olmakla birlikte, aşırı sıcak ve kurak iklim koşullarında verimli büyüme gösteremez. Ortalama yıllık sıcaklık 15-20°C civarında olduğunda en iyi şekilde gelişir (Ayrancı, 2023).

Kanada kavağı, diğer bitkilerle birlikte yetişebilen, ancak fazla gölgeyi tolere edemeyen bir türdür. Yüksek büyüme hızına sahip olması nedeniyle, yakın çevresindeki diğer bitkilerin gelişimini engelleyebilir. Bu ağacın köklerinden yayılan sürgünler, yeni alanlar elde etmesini sağlar ve bu özellik, onun ekolojik yayılımını hızlandırır (Karaçay, 2023).

1.6.3.4 Türkiye'deki yayılışı

Kanada kavağı (*Populus × euramericana*), dünya genelinde yaygın olarak bulunan ve özellikle orman ağaçlandırma çalışmaları ile tanınan bir türdür. Türkiye'de de bu türün yayılışı hem ekonomik hem de çevresel koşullar nedeniyle dikkat çekicidir. Kanada kavağı, ilk olarak 19. yüzyılın sonlarına doğru, orman ıslahı çalışmalarının bir parçası olarak Türkiye'ye getirilmiş ve hızla yayılmaya başlamıştır.

Kanada kavağı, Türkiye'de ilk olarak 1920'lerden itibaren, orman ıslahı ve ağaçlandırma projeleri kapsamında dikilmeye başlanmıştır. Özellikle Akdeniz, Ege ve Marmara bölgelerinde, sulama imkânlarının olduğu alanlarda yayılmaya başlamıştır. Bu bölgelerde, ağaçlandırma projelerinde hızlı büyüme özelliği nedeniyle tercih edilmiştir. Ayrıca, bu türün ekonomik değeri, kâğıt üretimi ve inşaat sektörü gibi alanlarda yaygın kullanımını sağlamıştır (Yıldız, 2022).

Türkiye'de Kanada kavağının yayılışı, genellikle sulak alanlar, akarsu kenarları ve gölet çevreleriyle sınırlıdır. Özellikle İç Anadolu Bölgesi ve Marmara Bölgesi'ndeki sulama projeleri, bu türün bu bölgelerde yayılmasına zemin hazırlamıştır. Ancak, aşırı sıcak ve kurak iklim koşullarında verimli gelişim gösteremeyen Kanada kavağı, genellikle bu tür koşullara sahip olmayan yerlerde sınırlı yayılım göstermektedir (Özdemir, 2021).

Kanada kavağı, nemli topraklarda ve su kaynaklarına yakın bölgelerde daha iyi gelişim gösterdiği için, Türkiye'de özellikle sulama yapılabilen alanlarda yayılım göstermektedir. Çiftliklerin ve sulama kanallarının çevresi, bu ağacın yerleşim için uygun alanlar oluşturur. Ayrıca, orman ıslahı projelerinin yanı sıra, bu tür çeşitli park ve peyzaj alanlarında da kullanılarak yayılımını sürdürmüştür (Karaçay, 2023).

Kanada kavağının Türkiye'deki yayılışı, bazı zorluklarla karşılaşmıştır. Bu tür, aşırı soğuk kış koşullarına dayanıksızdır ve özellikle İç Anadolu Bölgesi'nin yüksek rakımlı ve soğuk bölgelerinde sınırlı gelişim göstermektedir. Ayrıca, Türkiye'deki yerel flora ve fauna üzerinde baskı yaratabilmesi, bu ağacın yayılımını kısıtlayan faktörlerden biridir. Bununla birlikte, aşırı sulama ve toprak bozulması gibi çevresel faktörler de, bu türün sağlıklı bir şekilde yayılmasını engellemektedir (Yıldız, 2022).

Kanada kavağının Türkiye'deki yayılışı, özellikle orman ıslahı ve ağaçlandırma projelerinde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, ekolojik uyum ve çevresel etkileri göz önünde bulundurularak, bu türün yayılışı kontrol altına alınmalı ve yerel ekosistemlerle uyumlu bir şekilde kullanımı sağlanmalıdır.

1.6.3.5 Kanada kavağının endüstride kullanım alanları

Kanada kavağı (*Populus × euramericana*), hızla büyüyen, ekonomik değeri yüksek ve çok yönlü bir ağaç türüdür. Bu özelliği, özellikle endüstriyel kullanım alanlarında Kanada kavağının önemli bir yer tutmasını sağlar. Endüstriyel kullanım alanları hem odun özelliklerinden hem de hızlı büyüme hızından faydalanır.

Kâğıt ve Selüloz Üretimi: Kanada kavağının odunu, hafif ve yumuşak yapıya sahip olduğu için kâğıt üretiminde yaygın olarak kullanılır. Kâğıt endüstrisi, bu ağacın lif yapısını ve hızlı büyüme yeteneğini avantaja çevirir. Kanada kavağı, yüksek miktarda selüloz içeriğine sahip olup, kâğıt üretiminde bu özelliklerinden yararlanılmaktadır. Ayrıca, kâğıt dışı ürünler, özellikle karton üretiminde de Kanada kavağının odunu kullanılmaktadır (Özdemir, 2022).

Kanada kavağının odunu, işlenmesi kolay ve hafif olduğu için mobilya sanayisinde de tercih edilmektedir. Bu ağaç türü, ekonomik açıdan değerli olup, genellikle lamine ve kontrplak üretiminde kullanılır. Mobilya üreticileri, Kanada kavağının odununu, dayanıklı ancak hafif yapısı nedeniyle modern ve fonksiyonel tasarımlar için tercih etmektedirler (Yıldız, 2021).

Kanada kavağı, inşaat sektöründe de çeşitli kullanımlara sahiptir. Hafif yapısı, kolay işlenebilirliği ve uygun maliyeti, bu türün özellikle inşaat sektöründe panel ve yalıtım malzemeleri üretiminde kullanılmasını sağlar. Ayrıca, Kanada kavağı, prefabrik yapılar ve iç mekân dekorasyonlarında da kullanılır. Söz konusu ağacın, inşaat sektöründe düşük maliyetli ve çevre dostu alternatifler sunduğu belirtilmektedir (Ayrancı, 2023).

Kanada kavağı, biyokütle enerjisi üretimi için de önemli bir kaynaktır. Hızla büyümesi ve yüksek biyokütle verimi, bu ağacın enerji üretimi için uygun hale gelmesini sağlar. Özellikle biyokütle yakıtları üretimi, Kanada kavağının sürdürülebilir enerji seçenekleri olarak değerlendirilmesine olanak tanır (Karaçay, 2023).

Kanada kavağının odunu, işlenmesi kolay ve esnek olduğundan, lamine ve kontrplak üretiminde de kullanılır. Bu türün odunundan yapılan kontrplak, hafifliği ve dayanıklılığı sayesinde inşaat sektörü için önemli bir malzeme olarak kullanılır. Özellikle yapı sektöründe, dayanıklılık ve hafiflik arayışında tercih edilen bir malzeme olmuştur (Özdemir, 2022).

1.6.3.6 Kanada kavağının fiziksel ve mekaniksel özellikleri

Kanada kavağı (*Populus × euramericana*), fiziksel ve mekaniksel özellikleri bakımından endüstride geniş kullanım alanlarına sahip bir ağaç türüdür. Özellikle odununun özellikleri, bu türün çeşitli sektörlerdeki verimli kullanımını desteklemektedir.

Renk ve Doku: Kanada kavağının odunu genellikle açık sarımsı beyaz renkte olup, düzgün ve pürüzsüz bir dokuya sahiptir. Bu özellik, odunun işlenmesini kolaylaştıran önemli bir faktördür. Ayrıca, yüzeyi genellikle pürüzsüzdür, ancak bazen ince damarlar veya çizgiler içerebilir (Özdemir, 2022).

Kanada kavağının odununun yoğunluğu, yaklaşık olarak 0.40-0.55 g/cm³ arasında değişir. Bu, ağaç türünün hafif olduğunu ve kolay işlenebildiğini gösterir. Bu özelliği, özellikle mobilya ve kâğıt sanayinde tercih edilmesine neden olur (Yıldız, 2021).

Kanada kavağının kuru ağırlığı, genellikle 400-450 kg/m³ civarındadır. Bu da ağacın hafiflik özelliğini pekiştirir ve onun inşaat, mobilya ve kâğıt üretimindeki avantajlarını ortaya koyar (Karaçay, 2023).

1.6.3.7 Mekaniksel özellikler

Kanada kavağının mekanik dayanıklılığı, orta seviyededir. Odun, orta derecede sert olup, kolayca kırılmayacak kadar sağlamdır, ancak ağır yükler altına dayanıklılığı sınırlıdır. Bu nedenle, yapı malzemesi olarak kullanılırken dikkatli bir şekilde işlenmesi gerekmektedir. Kanada kavağının, özellikle lamine ve kontrplak üretiminde kullanılması, düşük sertlik ve işlenebilirlik açısından büyük avantaj sağlar (Özdemir, 2022).

Kanada kavağının çekme dayanımı, yaklaşık 40-50 MPa arasında değişmektedir. Bu, ağacın uzunluk boyunca gerilmelere karşı gösterdiği dayanımı ifade eder ve özellikle mobilya ve yapı malzemelerinde önemli bir özellik olarak öne çıkar (Ayrancı, 2023).

Eğilme dayanımı, Kanada kavağında 60-70 MPa civarındadır. Bu da ağacın bükülme veya eğilmeye karşı gösterdiği dirençtir. Bu mekanik özellik, mobilya üretimi ve inşaat sektöründe malzeme olarak kullanımını uygun hale getirir (Yıldız, 2021).

Bükülme dayanıklılığı ve sertlik modülü, Kanada kavağında orta derecededir. Bükülme dayanıklılığı yaklaşık 80-90 MPa arasında değişir. Bu da onun yapısal elemanlar ve mobilya üretiminde uygun bir malzeme olmasını sağlar (Karaçay, 2023).

Kanada kavağı, sıkıştırma dayanıklılığı açısından da iyi sonuçlar gösterir ve genellikle 40-50 MPa arasındadır. Bu özellik, özellikle konstrüksiyon malzemeleri ve yük taşıyan yapısal elemanlarda kullanılabilirliğini artırır (Özdemir, 2022).

Kanada kavağının fiziksel ve mekaniksel özellikleri, onu kâğıt üretimi, mobilya, inşaat ve yapı malzemeleri gibi sektörlerde tercih edilen bir malzeme yapmaktadır. Hafifliği,

işlenebilirliği ve dayanıklılığı, bu ağacın endüstriyel kullanımı için uygun özellikler sağlar.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE ÇALIŞMANIN HİPOTEZİ, AMACI, HEDEFLERİ VE ÖNEMİ

2.1 Literatür Artaştırması

Ahşap, tarih boyunca yapı malzemesi olarak kullanılan ve günümüzde de modern yapı teknolojilerinde yaygın biçimde tercih edilen doğal bir malzemedir. Yenilenebilir bir kaynak olması, estetik ve çevre dostu özellikleri ile diğer yapı malzemelerine göre önemli avantajlar sunar. Günümüzde ahşap malzemeler, doğal masif ağaç ürünlerinden başlayarak lamine edilmiş, çapraz lamine kereste (ÇLK) ve LVL (lamine veneer lumber) gibi mühendislik ürünlerine kadar çeşitlenmiştir. Bu mühendislik ahşapları, doğal ahşabın mekanik ve dayanıklılık açısından bazı sınırlamalarını aşmak için geliştirilmiştir. Ahşabın kullanım alanları konut yapılarından çok katlı ofis binalarına, köprülerden spor salonlarına kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır (Korkut, 2020).

Kurul'un (2019) belirttiğine göre, ÇLK gibi ileri düzey mühendislik ahşap ürünleri, ahşap yapı endüstrisinin modernleşmesinde ve çok katlı yapılarda ahşap kullanımının artmasında kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle karbon salımının azaltılması, sürdürülebilir kaynak kullanımı ve hızlı montaj gibi avantajlarıyla, ÇLK günümüzde geleneksel yapı malzemelerine alternatif olarak öne çıkmaktadır. Türkiye'de ise ÇLK kullanımının henüz sınırlı düzeyde olduğu, ancak özellikle ormancılık ve ahşap sanayisinin gelişmesiyle bu teknolojinin yaygınlaşma potansiyeli taşıdığı vurgulanmaktadır (Kurul, 2019).

Bu bağlamda, ÇLK sadece teknik özellikleriyle değil, çevresel katkıları ve endüstriyel potansiyeliyle de modern yapı sektöründe önemli bir malzeme olarak değerlendirilmektedir.

Çavuş ve diğ. (2024) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, göknar ve meşe odunlarından üretilen ÇLK panellerin orta katmanlarına %10 ve %20 oranlarında uygulanan perforasyon işleminin panellerin ses yutma performansı üzerindeki etkilerini incelemektedir. Deneysel olarak 51 mm ve 85 mm kalınlığında, 3 ve 5

katmanlı panellerle yapılan ölçümlerde, göknar odunlu panellerin meşe panellere kıyasla daha yüksek ses yutma katsayılarına sahip olduğu ve perforasyon oranının artmasının özellikle orta ve yüksek frekanslarda ses emilimini anlamlı düzeyde artırdığı belirlenmiştir. Katman sayısının etkisi ise istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Bu sonuçlar, düşük yoğunluklu ahşap türlerinin (örneğin göknar) ve yüksek perforasyon oranlarının (en az %20) ÇLK panellerin akustik performansını artırmakta etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, literatürde sınırlı sayıda ele alınan perforasyon-akustik ilişkisine katkı sunarken, yapı akustiğinde ÇLK kullanımına yönelik tasarım parametrelerine dair pratik öneriler geliştirmektedir; ancak çalışmanın sadece iki ahşap türü ve iki perforasyon oranı ile sınırlı kalması, daha kapsamlı sonuçlara ulaşmak açısından genişletilmesi gerektiğini göstermektedir (Çavuş ve diğ. 2024).

Bu çalışma, Şanlı ve Vural (2021) tarafından yayımlanmış olup, ÇLK panellerin yapı malzemesi olarak strüktürel performansını detaylı şekilde analiz etmektedir; araştırmada, Avrupa başta olmak üzere farklı iklim ve deprem bölgelerinde inşa edilmiş 46 adet 8–24 katlı çok katlı yapının veri tabanı üzerinden, ÇLK'nın duvar, döşeme ve çekirdek sistemlerde taşıyıcı ve bölücü eleman olarak etkin şekilde kullanıldığı; panel sistemli yapılarla karkas ve hibrit sistemlerin karşılaştırıldığı; yapı yüksekliği, açıklık ve aks aralıklarının dinamik olarak değişmekle birlikte, panel sistemlerde inşaat süresinin betonarme sistemlere kıyasla belirgin şekilde daha kısa olduğu; CO₂ tutma kapasitesinin yüksekliğiyle çevresel fayda sağladığı; esnek plan şemalarına, hızlı montaja ve deprem riski taşıyan alanlarda bile uygulanabilirliğine dair net veriler elde edildiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, ÇLK yapı malzemesinin strüktürel açıdan hem tek başına hem hibrit sistemlerde yüksek performans gösterdiği; özellikle hızlı üretim, sürdürülebilirlik, taşıyıcılık, rijitlik ve çevre dostu karbon salım dengesi açısından geleneksel betonarme/çelik sistemlere sağlam bir alternatif olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur (Şanlı ve Vural, 2021).

Artun (2021) yaptığı çalışmada, ÇLK panellerin bina enerji performansı üzerindeki etkisini Trabzon iklim bölgesinde örnekleyerek analiz etmiş, ÇLK duvarlarda farklı katman kombinasyonları ve malzeme parametreleriyle toplam 26 farklı model oluşturmuştur. Bu modellerde kullanılan parametreler arasında katman kalınlığı, ahşap yoğunluğu, ısı iletkenlik katsayısı ve buhar difüzyon direnci gibi

termofiziksel özellikler öne çıkmaktadır. Her bir ÇLK panel yapılandırması, DesignBuilder simülasyon programı kullanılarak yıllık ve aylık bazda enerji tüketimi, ısıtma-soğutma yükleri açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, daha kalın ve düşük ısı iletkenliğine sahip ÇLK kombinasyonlarının, geleneksel duvar sistemlerine göre çok daha düşük enerji tüketimi sağladığı görülmüştür. Özellikle lif yönüne dik yerleştirilmiş katmanların buhar geçirgenliği üzerindeki olumlu etkisi, iç ortam konforunu korurken enerji kayıplarını minimize ettiği için dikkat çekicidir. Tez, ÇLK'nın sadece yapısal değil, aynı zamanda termal performans açısından da yüksek potansiyele sahip bir malzeme olduğunu vurgularken, farklı konfigürasyonlar arasında %15'e kadar değişen enerji verimlilik farkları gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Bu yönüyle çalışma, ÇLK'nın pasif yapı tasarımındaki rolünü hem mimari hem de mühendislik bakış açısıyla değerlendiren özgün bir araştırma niteliği taşımaktadır (Artun, 2021).

Hıdı (2024) yaptığı bu çalışmada, karaçam (*Pinus nigra*) odunundan üretilen ÇLK panellerin mekanik özelliklerinin farklı nem oranlarında nasıl değiştiğini detaylı biçimde incelemektedir; deneysel tasarımda nem içeriği kontrollü şekilde değiştirilmiş paneller üzerinde eğilme, kesme ve basınç testleri uygulanarak, nemin yapısal performansa etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlar, nem oranı arttıkça özellikle eğilme ve kesme dayanımlarında anlamlı azalmalar meydana geldiğini, bunun en çok panel katmanları arasındaki yapışma bölgelerinde görüldüğünü ortaya koymaktadır; düşük nem seviyelerinde ise panellerin elastik modüllerinin ve maksimum taşıma kapasitelerinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı, panelin kalınlığı ve katman konfigürasyonu ile doğrudan ilişkili olup, düşük nemde yüksek rijitlik sağlanırken, yüksek nem ortamlarında hücre duvarı suyla şiştiği için hem mekanik bütünlük hem de yapışma kalitesi zayıflamaktadır. Kesme testlerinde, nemin en olumsuz etkisi yapışkan tabakada gözlenmiş ve özellikle çok katmanlı panellerde arayüzey bozulmaları meydana gelmiştir; buna karşın basınç dayanımı nem artışından daha az etkilenmiş ve düşey yük taşıma kapasitesi daha stabil kalmıştır. Genel olarak, ÇLK panellerin nem içeriğine karşı duyarlılığı, yapısal hesaplamalarda nem koşullarının dikkate alınması gerektiğini ve üretim aşamasında yapıştırıcı seçimi, katman düzeni ve panel kalınlığının optimize edilmesinin zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır.

Tankut (2014) bu bildiride mühendislik ürünü ahşap malzemelerin (MÜAM) mekanik performansı ve üretim parametreleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş olup, katman sayısı, panel kalınlığı, ahşap türü, yoğunluk ve yapıştırıcı tipi gibi faktörlerin malzemenin dayanımı ve rijitliği üzerindeki etkileri sayısal verilerle desteklenmiştir. Örneğin, katman sayısının 3'ten 7'ye çıkarılması durumunda eğilme dayanımında %20-30 arasında artış sağlandığı; panel kalınlığının 20 mm'den 60 mm'ye yükseltilmesinin rijitlik modülünü yaklaşık 2 katına çıkardığı belirtilmiştir. Ayrıca, yoğunluğu 450 kg/m^3 olan karaçamın kullanıldığı ÇLK panellerde eğilme mukavemetinin ortalama 35 MPa civarında seyrettiği; daha yüksek yoğunluklu (550 kg/m^3) ladin panellerde ise bu değerin 45 MPa'ya kadar yükseldiği ifade edilmiştir. Yapıştırıcı türünün değişiminin ise katmanlar arası kesme dayanımı üzerinde %15'e varan iyileştirmeler getirdiği vurgulanmıştır. Bildiride ayrıca, MÜAM'ların geleneksel masif ahşap ürünlere kıyasla %25-40 daha yüksek mekanik performans sunduğu sayısal olarak desteklenmiş ve bu üstünlüğün özellikle dayanıklılık ve boyutsal stabilite üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Bu nicel veriler, MÜAM üretiminde parametre optimizasyonunun ürün kalitesi ve performansı artırmadaki kritik rolünü net biçimde ortaya koymaktadır.

Christovasilis (2016) yaptığı bu çalışmada, ÇLK panellerinin yangına karşı performansını deneysel testler ve sayısal modellemelerle derinlemesine analiz etmektedir. Deneylerde farklı katman sayısı (3, 5, 7 katman) ve katman kalınlıkları kullanılarak yangın dayanım süreleri incelenmiştir. Örneğin, 3 katmanlı paneller yaklaşık 30 dakika yangına dayanırken, 7 katmanlı kalın panellerin bu süre 60 dakikaya kadar çıkmıştır; bu da katman sayısı ve kalınlığın yangın direncini iki katına kadar artırdığını göstermektedir. Ayrıca, fenolik bazlı yapıştırıcıların yüksek sıcaklıklara karşı direnci, yapışma bütünlüğünü koruyarak yangın anında panelin mekanik dayanımının %70–80'ini muhafaza etmesini sağlamıştır. Ahşap türü olarak karaçam ve ladin kullanılmış, karaçam panellerin yoğunluğunun daha yüksek olması nedeniyle yangın dayanımının %10–15 daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Sayısal modellemeler ise termal iletkenlik, ısı yayılımı ve mekanik dayanım arasındaki etkileşimi simüle etmiş ve deney sonuçlarıyla %90 uyum sağlamıştır. Sonuçlarda, katman kalınlığı, yapıştırıcı tipi ve ahşap türünün yangın performansında kritik parametreler olduğu, bu parametrelerin optimize

edilmesiyle ÇLK panellerin yangına dayanıklılığının önemli ölçüde artırılabilceğı vurgulanmıştır. Bu da ahşap yapıların yangın yönetmeliklerine uygun hale getirilmesinde ve sürdürülebilir yapı çözümlerinin yaygınlaşmasında belirleyici bir faktördür.

Çavuş 2019 Yaptığı çalışmada, ÇLK ürününün üretim teknikleri, fiziksel ve mekanik özellikleri, yapısal avantajları ve dünya genelindeki kullanım alanları üzerine kapsamlı bir literatür sunmaktadır. Çalışmada, geleneksel yapı malzemelerine alternatif olarak öne çıkan ÇLK'nın, çok katmanlı lamine yapısı sayesinde yüksek dayanım, şekil stabilitesi ve yangına karşı direnç gibi üstün özellikler gösterdiği vurgulanmakta; özellikle sürdürülebilirlik, karbon emisyonunun azaltılması ve hızlı montaj gibi çevresel ve yapısal avantajları detaylandırılmaktadır. Ayrıca Avrupa ve Kuzey Amerika başta olmak üzere birçok ülkede ÇLK kullanımının hızla yaygınlaştığı ve çok katlı ahşap yapıların inşasında önemli bir rol üstlendiğı belirtilmektedir. Türkiye'de ise bu ürünün henüz yaygınlaşmadığı, ancak orman endüstrisi açısından önemli bir potansiyel taşıdığı ifade edilmekte, üretim süreci ve standartlaşma konularında yapılması gerekenlere de dikkat çekilmektedir.

Kasal ve diğ. (2010) tarafından yürütölen bu çalışmada, masif ve lamine edilmiş ağaç malzemelerin eğilme direnci ve elastikiyet modölü karşılaştırmalı olarak değeriendirilmiştir. Çalışmada test numuneleri olarak ladin (*Picea orientalis*), sarıçam (*Pinus sylvestris*) ve doğu kayını (*Fagus orientalis*) türleri kullanılmış; her tür için hem masif hem de lamine örnekler hazırlanmıştır. Lamine elemanlar, üç katmanlı olarak ve fenol-formaldehit tutkalı ile preslenerek üretilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, her üç ağaç türünde de lamine örnekler, masif örneklere kıyasla daha yüksek eğilme direnci ve elastikiyet modölü göstermiştir. Örneğın, ladin lamine örneklerde eğilme direnci yaklaşık %25 artış göstermiştir. Kayın gibi yoğunluk bakımından yüksek olan türlerde bu fark daha da belirginleşmiş; elastikiyet modölü değerilerinde %30'a varan artışlar gözlenmiştir. Lamine ürünlerdeki lif yönü sürekliliğı, boşluksuz yapı ve kusurların azaltılması bu artışların temel sebepleri olarak açıklanmıştır. Bu sonuçlar, taşıyıcı yapılarda mühendislik ürünü ahşap malzemelerin, özellikle lamine elemanların, doğal ahşaba göre çok daha verimli ve güvenli performans sunduğunu göstermektedir.

Oran (2012) tarafından Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde gerçekleştirilen bu yüksek lisans tezinde, Hindistan cevizi (*Cocos nucifera* L.) odunundan üretilen çapraz yapıştırılmış lamine kerestelerin (ÇLK) bazı teknolojik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada, tropik bölgelerde bolca bulunan ancak geleneksel yapı kerestesi olarak pek değerlendirilmeyen Hindistan cevizi odununun, mühendislik ürünü ahşap malzeme üretiminde kullanılabilirliği incelenmiştir. Araştırmada, ÇLK paneller farklı katman sayıları ve lif yönleri dikkate alınarak hazırlanmış, üretilen örneklerin yoğunluk, eğilme direnci, elastikiyet modülü, vida tutma direnci ve yapışma dayanımı gibi teknolojik özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre, Hindistan cevizi odunu kullanılarak üretilen ÇLK örneklerinin yoğunluklarının oldukça yüksek olduğu (yaklaşık 900 kg/m³ civarı) ve buna bağlı olarak mekanik performanslarının da tatmin edici düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Özellikle lif yönlerinin çapraz yerleşimiyle birlikte, eğilme dayanımının ve elastikiyet modülünün arttığı, vida tutma direncinin ise yüksek yoğunluk nedeniyle oldukça başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Araştırma, alternatif ve yerel odun kaynaklarının mühendislik amaçlı kullanımına olanak sağlayabileceğini göstermekte; Hindistan cevizi gibi tropik türlerin, uygun tekniklerle işlenerek yüksek performanslı yapı malzemelerine dönüştürülebileceğini ortaya koymaktadır.

Özen (2017) tarafından Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde hazırlanan bu yüksek lisans tezinde, ısıtma işlemi görmüş ahşap malzemenin ÇLK üretiminde kullanım olanakları araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, ısıtma işlemi uygulamasının ahşabın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini belirlemek ve bu işlem görmüş ahşapların mühendislik odaklı ÇLK üretiminde değerlendirilip değerlendirilemeyeceğini ortaya koymaktır. Deneysel çalışmalarda sarıçam (*Pinus sylvestris*) türü kullanılmış ve farklı sıcaklık seviyelerinde (180°C, 200°C, 220°C) ısıtma işlemi uygulanmış ahşap katmanlar kullanılarak ÇLK paneller üretilmiştir. Bu panellerin yoğunluk, eğilme direnci, elastikiyet modülü, vida tutma direnci ve yapışma dayanımı gibi teknolojik özellikleri test edilmiştir. Sonuçlara göre, ısıtma işlemi ahşabın nem içeriğini ve yoğunluğunu azaltmış; buna bağlı olarak eğilme direnci ve vida tutma direnci sınırlı ölçüde düşmüş, fakat boyutsal stabilite, biyolojik dayanıklılık ve suya karşı direnç artmıştır. Isıtma işlemi sıcaklığı yükseldikçe yapışma dayanımı azalma eğilimi göstermiştir. Bu bulgular, ısıtma işlemi ahşabın

ÇLK üretiminde bazı sınırlamalarla birlikte kullanılabileceğini, özellikle nem ve biyotik zararlılara karşı dayanımın artırılması hedeflendiğinde uygun bir alternatif oluşturabileceğini göstermektedir. Çalışma, sürdürülebilir üretim teknikleri ve uzun ömürlü yapı malzemeleri açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Das ve diğ. (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kavak (*Populus nigra* L.) ve melez akçaağaç-kavak (*Acer platanoides* L. – *Populus nigra* L.) türlerinden üretilen ÇLK panellerin eğilme ve yuvarlanma kayma performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada, kavak odunu ile üretilen homojen ÇLK panellerin, geleneksel ladin (*Picea abies*) panellere eşdeğer ya da üstün mekanik özellikler sergilediği, özellikle melez panellerde dış katman olarak yüksek yoğunluklu akçaağaç kullanıldığında eğilme modülünde %74 ve eğilme dayanımında %37 oranında artış sağlandığı görülmüştür. Yuvarlanma kayma dayanımı da benzer şekilde dış katman etkisiyle artmıştır. Farklı tutkalların (1C-PUR ve melamin esaslı ME) kullanıldığı panellerde, tutkaldan bağımsız olarak ahşap türünün performans üzerinde anlamlı etkisi olduğu saptanmış; ancak tür ve tutkal etkileşimi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Deneysel bulgular, teorik analiz yöntemleri (kesme analojisi, modifiye gamma yöntemi, Timoshenko teorisi) ve sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılmış ve en yüksek doğruluk modifiye gamma yöntemiyle elde edilmiştir. Bu çalışma, düşük yoğunluklu sert odun türlerinin melez ÇLK tasarımlarında kullanım potansiyelini ortaya koyarak sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirme açısından önemli katkılar sunmaktadır.

O’Ceallaigh, ve diğ. (2018) tarafından yürütülen çalışmada, farklı panel yerleşimlerinin (lay-up) ÇLK panellerin karakteristik eğilme ve yuvarlanma kayma dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında 60 mm, 100 mm ve 120 mm kalınlıklarda üç farklı ÇLK panel konfigürasyonu incelenmiş; 60 mm ve 120 mm paneller üç eşit katmandan, 100 mm panel ise beş eşit katmandan oluşmuştur. Deneysel bulgular, panel kalınlığı arttıkça ortalama eğilme ve yuvarlanma kayma dayanımının azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, karakteristik eğilme dayanımı, beş katmanlı 100 mm panellerde, üç katmanlı 60 mm panellere göre daha yüksek bulunmuştur. Yuvarlanma kayma dayanımında ise beş katmanlı panellerde ortalama değerler azalmış olsa da daha fazla sayıda katmanın kayma kuvvetine maruz kalması, dayanım üzerindeki varyasyonu azaltmıştır. Bu çalışma, katman sayısı ve iç yerleşim düzeninin ÇLK'nın mekanik

performansında belirleyici rol oynadığını vurgulamakta ve tasarım sürecinde bu parametrelerin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Mohd Yusof ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, Acacia mangium odunu kullanılarak üretilen üç katmanlı ÇLK panellerde kullanılan tutkal türlerinin fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerde fenol-rezorsinol-formaldehit (PRF) ve tek bileşenli poliüretan (PUR) yapıştırıcıları kullanılmış; su alma, kalınlık şişmesi ve delaminasyon gibi fiziksel özellikler ile eğilme, kayma ve basma dayanımı gibi mekanik özellikler değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, PRF tutkallı paneller, PUR tutkallı panellere kıyasla daha düşük su alma ve daha az delaminasyon göstererek daha üstün fiziksel özellikler sergilemiştir. Mekanik performans açısından da PRF ile yapıştırılmış panellerin elastiklik modülü, eğilme dayanımı (MOR) ve kayma modülü (G) değerleri PUR'a kıyasla anlamlı düzeyde yüksek bulunmuştur. Örneğin, PRF-bazlı ÇLK'nın kayma modülü 116.50 N/mm² iken, PUR için bu değer 92.48 N/mm² olarak ölçülmüştür. Basma dayanımında da benzer bir eğilim gözlenmiş ve PRF tutkallı panellerin hem modül hem de dayanım değerleri PUR'a göre daha yüksek çıkmıştır. Bu çalışma, ÇLK üretiminde tutkal türü seçiminin performans üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ve PRF bazlı tutkalların özellikle yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Dobeš, ve diğ. (2023) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, İskandinav ladini kullanılarak üretilmiş farklı katman sayılarına (üç, beş ve yedi) sahip ÇLK panellerin rijitlik ve deformasyon özellikleri deneysel testler, analitik hesaplamalar ve sayısal modellemeler aracılığıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada dört noktalı eğilme testleri uygulanarak yük-deformasyon eğrileri elde edilmiş ve üç katmanlı panellerin mekanik davranışları SCIA Engineer ve ANSYS Workbench yazılımları ile geliştirilen sonlu eleman modelleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, analitik hesaplamalar mevcut Avrupa standardına göre gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, deneysel veriler ile analitik ve sayısal modeller arasında iyi bir uyum olduğunu ortaya koymuş; özellikle eğilme davranışı bakımından doğrulayıcı veriler sunmuştur. Bu çalışma, farklı panel kalınlıklarının ve katman sayılarının ÇLK'nın yapısal performansını nasıl etkilediğine dair kapsamlı bir analiz sunmakta ve mühendislik uygulamaları için güvenilir tasarım yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Xie ve diğ. (2020) tarafından yürütülen çalışmada, Kanada Hemlock türünden üretilmiş üç katmanlı ÇLK panellerin eğilme ve kesme mekanik özellikleri dört nokta eğilme, kısa açıklıklı üç nokta eğilme ve blok kesme testleriyle analiz edilmiştir. Araştırmada ANSI APA PRG320:2012 standardı doğrultusunda yapılan deneyler sonucunda, ÇLK panellerin elastik modülü, eğilme dayanımı, ara katman kesme dayanımı ve yapışma performansları belirlenmiştir. Deneysel veriler, ÇLK'nın elastik olmayan deformasyon fazına ulaştığında ilk olarak dik katmanda yuvarlanma kesmesi meydana geldiğini, ardından bu hasarın ara yüzeye yayılarak kesme veya paralel katmanda çekme kırılmasıyla sonuçlandığını göstermektedir. Ayrıca Grade 1 kalitesindeki ÇLK panellerin, Grade 2'ye kıyasla daha yüksek eğilme ve kesme dayanımı sunduğu tespit edilmiştir. Vakum-basınç işlemine tabi tutulan örneklerde yapışma performansının %40'tan fazla düştüğü görülmüş, bu da hava koşullarına dayanıklı yapıştırıcı seçiminin önemini ortaya koymuştur. Çalışma, farklı kalite derecelerinin ÇLK mekanik özellikleri üzerindeki etkisini ortaya koyarak, üretim süreçlerinin optimize edilmesine ve yapısal uygulamalar için güvenilir ÇLK tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Brandner ve diğ. (2024) tarafından yürütülen bu çalışma, ÇLK panellerin düzlem dışı eğilme davranışlarını çok yönlü bir yaklaşımla incelemektedir. Deneysel veriler, analitik çözümler ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda, panel kalınlığı, lamina sayısı, yapısal konfigürasyon ve malzeme parametrelerinin düzlem dışı eğilme rijitliği ve dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında hem elastik hem de elastik olmayan deformasyonlar dikkate alınarak, panel davranışının geleneksel kırış teorileriyle tam olarak açıklanamadığı, bu nedenle gelişmiş hesaplama modellerine ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır. Özellikle tabakalar arası kayma ve yuvarlanma kesmesi gibi ikinci dereceden etkilerin, ÇLK'nın düzlem dışı performansında belirleyici olduğu ortaya konmuştur. Bu bağlamda çalışma, düzlem dışı yükler altındaki ÇLK yapılarının mühendislik tasarım süreçlerinde daha doğru tahminler yapılabilmesi adına hem teorik hem de sayısal modellerin iyileştirilmesi gerektiğini ortaya koymakta ve literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

Yin ve diğ. (2023) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, hızlı büyüyen göknarı (Chinese fir) kullanılarak üretilen ÇLK panellerin eğilme ve kesme özellikleri üzerindeki laminasyon kalitesinin etkileri kapsamlı biçimde incelenmiştir. Farklı

görsel sınıflara ayrılmış laminalar kullanılarak üretilen paneller, dört nokta eğilme testi ve kayma testlerine tabi tutulmuş ve yapısal performans parametreleri karşılaştırılmıştır. Bulgular, düşük kaliteli laminaların dış tabakalarda kullanıldığı panellerin eğilme dayanımı ve elastiklik modülü değerlerinde düşüş yaşandığını göstermiştir. Bununla birlikte, lamina kalitesinin özellikle ara katmanlarda olduğu durumlarda rulo kesme (rolling shear) direncinde belirgin farklar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Kullanıma, ÇLK üretiminde görsel kalite sınıflandırmasının yalnızca estetik değil, aynı zamanda mekanik dayanım açısından da belirleyici olduğunu vurgulamakta ve düşük kaliteli laminaların etkin kullanım stratejilerinin, hızlı büyüyen türlerin sürdürülebilir yapı malzemelerine entegrasyonu açısından önemli katkılar sunabileceğini ortaya koymaktadır.

2.1.1 ÇLK Malzemelerde Odun Türünün Etkisini Analiz Eden Çalışmaların Literatür Özeti

ÇLK, kendine özgü yapısal avantajları ve sürdürülebilirlik katkıları sayesinde giderek daha fazla ilgi gören bir mühendislik ahşap ürünüdür. ÇLK'nin performans özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden biri, üretiminde kullanılan odun türlerinin seçimidir. Yapılan birçok çalışma, farklı ağaç türlerinin mekanik özelliklerini, yapışma davranışlarını ve genel yapısal performanslarını inceleyerek ÇLK malzemelerine ilişkin literatüre katkıda bulunmuştur.

ÇLK'nin mekanik davranışı, yuvarlanma kayma (rolling shear) özellikleri aracılığıyla da değerlendirilebilir. Rahman ve arkadaşları, ÇLK panellerin düzlem dışı yükleme altındaki davranışını Timoshenko yöntemiyle analiz ederek, kullanılan ağaç türlerinin kayma modülü üzerindeki etkilerini incelemiştir (Rahman ve diğ., 2020). Bu araştırma, farklı ağaç türlerinin yuvarlanma kayma performansına önemli katkılarda bulunduğunu ve bunun ÇLK'nin yapısal verimliliğini doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur (Rahman ve diğ., 2020). Wang ve arkadaşları ise ÇLK'nin yuvarlanma kayma özelliklerinin yalnızca türler arasında değil, aynı tür içerisindeki lif yönlenmeleri arasında da değişiklik gösterdiğini vurgulamıştır (Wang ve diğ., 2018). Böylece, ÇLK yapılarının amaçlanan uygulamalara göre optimize edilmesi açısından mimar ve mühendisler için büyük önem taşımaktadır.

Lamine katmanlar arasındaki yapışma dayanımı, CLK'nın yapısal etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Song ve Hong'un araştırması, farklı ağaç türlerinin laminalar arasındaki yapışma özelliklerini etkileyebileceğini göstermektedir; bu da bileşimin genel dayanımını belirleyen önemli bir unsurdur (Song ve Hong, 2016). Araştırmada, farklı tutkalların belirli odun türleriyle farklı etkileşim gösterdiği ve bunun hem dayanıklılığı hem de direnç performansını etkilediği rapor edilmiştir. Bu durum, CLK üretiminde kullanılacak ağaç türüne özel tutkal seçimi yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır (Song ve Hong, 2016). Odun türünün tutkalla uyumu üzerindeki etkisi ayrıca Okuni ve Bradford tarafından da incelenmiş ve farklı türlerdeki ısı performanslarının değiştiği gösterilmiştir (Okuni ve Bradford, 2020). Bu bulgular, CLK sistemlerinde malzeme etkileşimlerinin bütüncül bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

CLK'nın mekanik özellikleri büyük ölçüde kullanılan odun türüne bağlıdır. Abdoli ve arkadaşları, kavak ve köknar gibi farklı türlerin bağlantı elemanlarının vida tutma dayanımı performansın değiştiğini ve bunun da CLK'nın yapı uygulamalarındaki etkin kullanımını etkilediğini ortaya koymuştur (Abdoli ve diğ., 2022). Hızlı büyüyen türler olan kavak gibi ağaçlar, özellikle geleneksel odun kaynaklarının kıt olduğu bölgelerde değerli bir alternatif olarak görülmektedir (Abdoli ve diğ., 2022). Ayrıca, Baño ve arkadaşları, küçük çaplı kütüklerden üretilen Loblolly çamı (*Pinus teada*) ve Slash çamı (*Pinus elliottii*) türlerinden yapılan CLK panellerin eğilme davranışını incelemiştir. Bu çalışma, daha az kullanılan türlerin yeterli taşıma kapasitesini koruyarak CLK üretimine katkı sağlayabileceğini vurgulamaktadır (Baño ve diğ., 2018). Kentleşme kaynaklı sürdürülebilir kaynak kullanımına yönelik eğilimle birlikte, ekonomik açıdan uygun türlerin kaplama ve dolgu yapılarında kullanılması, yapısal bütünlükten ödün vermeden CLK'nın sürdürülebilirliğini artırabilir (Baño ve diğ., 2018).

CLK üretiminde farklı odun türlerinin kullanılmasıyla ilgili çevresel etkiler de dikkate değerdir. Concu'ya göre, çapraz katmanlı yapı konfigürasyonları, genellikle düşük mekanik özelliklere sahip yerel türlerin kullanımına olanak sağlayarak sürdürülebilirliği desteklemektedir (Concu, 2023). Bu yaklaşım, yapıda geleneksel olarak göz ardı edilen türlerin –örneğin Sardunya Deniz Çamı veya Sarı Kavak– değerlendirilmesini sağlayarak yerel orman endüstrilerinin gelişmesine katkı sunar (Concu, 2023; Azambuja ve diğ., 2022). Yerel türlerin tercih edilmesi,

yalnızca sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemekle kalmaz, aynı zamanda yerel ekonomileri katkı sağlar ve ithal odun kullanımından kaynaklanan taşıma emisyonlarını da azaltır.

Sonuç olarak, odun türlerinin ÇLK üzerindeki etkileri; mekanik özellikler, yapışma performansı ve sürdürülebilirlik gibi çok yönlü boyutlara sahiptir. Artan literatür, ÇLK ürünlerinin tasarımı ve üretiminde ağaç türü seçiminin dikkatle yapılmasının önemini ortaya koymaktadır. Yapı sektörü, sürdürülebilir yapı uygulamaları için ÇLK'yı giderek daha fazla benimserken, malzeme seçiminin optimize edilmesi ve yapısal performansın artırılması amacıyla yapılan araştırmalar, ÇLK'nın farklı mimari uygulamalardaki kullanımını daha da genişletecektir.

2.1.2 ÇLK Malzemelerde Katman Kalınlığının Etkisini Analiz Eden Çalışmaların Literatür Özeti

ÇLK, karşılıklı dik yönlerde yerleştirilen ahşap katmanlarından oluşan özgün yapısı sayesinde sürdürülebilir ve verimli bir yapı malzemesi olarak öne çıkmaktadır (Tan ve Liew, 2022). ÇLK'nın performans özellikleri çeşitli faktörlerden etkilenmekte olup, bu faktörler arasında katman kalınlığı, mekanik ve fiziksel özellikler üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ışığında, ÇLK panellerinde katman kalınlığının performans parametreleri üzerindeki etkisi aşağıda sunulmuştur.

ÇLK'nın eğilme, kayma dayanımı ve basma dayanımı gibi mekanik özellikleri, katman kalınlığından önemli ölçüde etkilenmektedir. O'Ceallaigh ve arkadaşlarının yaptığı araştırma, panel kalınlığı 60 mm'den 120 mm'ye çıkarıldığında ortalama eğilme dayanımı ve yuvarlanma kayma dayanımında azalma gözlemlendiğini ortaya koymuştur (O'Ceallaigh ve diğ., 2018). Bu durum, kalın panellerin genelde daha fazla stabilite sağlasa da belirli dayanım özelliklerinden ödün verebileceğini ve tasarım aşamasında dikkatli bir değerlendirme yapılması gerektiğini göstermektedir. Li'nin araştırması da bu bulguları desteklemekte olup, lamine kalınlığındaki değişimin yuvarlanma kayma dayanımını doğrudan etkilediğini göstermiştir. 20 mm ve 35 mm kalınlığında laminalarla yapılan deneylerde, yuvarlanma kayma performansında anlamlı farklılıklar tespit edilmiş ve bu durumun, farklı yük koşullarına göre katman kalınlığının optimize edilmesi gerekliliğini ortaya koyduğu belirtilmiştir (Li, 2017). Benzer şekilde, He ve

arkadaşları da kara ladin kullanılarak üretilen üç ve beş katmanlı ÇLK panellerde kalınlığın eğilme ve kayma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmış; daha kalın konfigürasyonların eğilme yüklerine karşı daha dirençli olduğunu raporlamıştır (He ve diğ., 2020). Ancak, bu artan kalınlık, kayma kapasitesiyle ilgili karmaşıklıkları da beraberinde getirerek genel performans etkileyebilir. Mendes ve arkadaşları, farklı katman kalınlıkları ve konfigürasyonlarına sahip ÇLK panellerin lif yönüne dik basınç altındaki taşıma kapasitelerini incelemiş; kalınlığın değişiminin basma dayanımını ve genel yapı davranışını etkilediğini göstermiştir (Mendes ve diğ., 2024). Bu çalışma, katman kalınlığı ile yapısal performans arasındaki karmaşık ilişkinin altını çizmekte ve tasarım değişikliklerinin bu değişkenler dikkate alınarak yapılmasının gerekliliğine işaret etmektedir.

Katman kalınlığı yalnızca mekanik düzenlemeyi değil, aynı zamanda ÇLK panellerindeki yapışma performansını da etkilemektedir. Miyazaki ve arkadaşları, eşit olmayan lamina kalınlıklarının işleme hassasiyetindeki farklılıklara bağlı olarak tutkal hatlarında boşluklara yol açabileceğini belirtmiştir. Bu tür boşluklar, yapışma bütünlüğünü zayıflatmakta ve panelin yapısal bütünlüğünü azaltabilmektedir (Miyazaki ve diğ., 2023). Bu durum, özellikle farklı kalınlıklarda laminaların kullanıldığı uygulamalarda, laminasyon işleminin yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

ÇLK'nın yangın davranışı da katman kalınlığı ile ilişkilidir. Wang ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, panelin kalınlığı ve katman sayısına bağlı olarak yangın performansının değiştiği gösterilmiştir (Wang ve diğ., 2019). Daha kalın katmanlar ve fazla katmanlı panellerin genellikle daha iyi yangın dayanımı sergilediği ve bu durumun, ÇLK kullanılan yapılarda güvenlik açısından olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Katman kalınlığı, aynı zamanda ÇLK'nın yangına maruz kaldığında gösterdiği termal performansı da etkileyerek kömürleşme hızı ve ısı yalıtımı kapasitesi üzerinde belirleyici olmaktadır (Wang ve diğ., 2019).

Sonuç olarak, literatür taraması, katman kalınlığı ile ÇLK'nın fiziksel ve yapısal özellikleri arasında çok yönlü bir ilişkinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Daha kalın paneller bazı mekanik özellikleri artırabilse de yapışma bütünlüğü ve boyutsal hassasiyetin sağlanması büyük önem taşımaktadır; aksi takdirde kayma veya yapışma kaynaklı performans kayıpları ortaya çıkabilir. Ayrıca, yangın dayanımı, termal performans ve basma davranışı da katman kalınlığıyla birlikte

değerlendirilerek tasarım kararlarının daha isabetli verilmesi sağlanmalıdır. Yapı sektörü ÇLK'yı geleneksel yapı malzemelerine alternatif olarak benimsemeye devam ettikçe, yapıla çalışmalar, malzeme performansının optimize edilmesi ve yapısal güvenliğin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Gelecekteki çalışmalar, katman kalınlığı ile performans parametreleri arasındaki etkileşimi daha doğru biçimde öngören kapsamlı modeller geliştirmeye odaklanmalı ve sürdürülebilir yapı ürünlerinin gelişimine katkı sunmalıdır.

2.1.3 ÇLK Malzemelerde Tutkal Türünün Etkisini Analiz Eden Çalışmaların Literatür Özeti

ÇLK, sürdürülebilirliği, estetik yapısı ve yüksek taşıma kapasitesi sayesinde yapı sektöründe hızla önem kazanmaktadır. ÇLK'nın performans özelliklerini belirleyen temel unsurlardan biri, üretim sürecinde kullanılan tutkal türüdür. Fenol-rezorsinol-formaldehit (PRF), poliüretan (PUR) ve melamin formaldehit (MF) gibi çeşitli tutkallar, farklı mekanik ve dayanıklılık özellikleri sunarak ÇLK panellerinin genel etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Tutkal türünün ÇLK özellikleri üzerindeki etkilerine ilişkin güncel araştırma bulgularını aşağıda verilmiştir.

Tutkal türü, ÇLK'nın yapışma dayanımı ve mekanik performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Amin ve arkadaşları, melamin esaslı MF-1 tutkalının PRF ve PUR tutkallarına kıyasla daha yüksek blok kayma dayanımı sağladığını ve Jabon ağacından yapılan ÇLK panellerinde üstün yapışma performansı gösterdiğini raporlamıştır (Amin ve diğ., 2023). Bu yüksek performans, MF-1'in geniş moleküler yapısından kaynaklanan yüksek kohezyon dayanımına bağlanmakta ve gerilim altında delaminasyona karşı dirençli olmasını sağlamaktadır. Yusof ve arkadaşlarının çalışması, Acacia mangium odunundan yapılan ÇLK panellerde PRF tutkalının, PUR tutkala kıyasla daha yüksek kayma dayanımı ve odun kırılma yüzdesi sağladığını göstermiştir (Yusof ve diğ., 2020). Bu bulgu, Li ve arkadaşlarının çalışmalarıyla da desteklenmiş; PRF'nin farklı koşullar altında PUR'a kıyasla üstün yapışma performansı gösterdiği ve odun türüne göre uygun tutkal seçiminin önem taşıdığı vurgulanmıştır (Li ve diğ., 2021). Benzer şekilde, Sikora ve arkadaşları da tutkal bağlantılarının kayma dayanımı ve dayanıklılığını test etmiş; PRF ve PUR tutkallarının, uygulama sırasında farklı baskı kuvvetlerine bağlı olarak farklı performanslar sergilediğini belirtmiştir (Sikora ve diğ., 2015).

Tutkalın yüksek sıcaklıklardaki performansı da araştırmalarda odak noktası olmuştur. Wiesner ve arkadaşları, PUR tutkalla birleştirilen ÇLK panellerin mekanik özelliklerinin yüksek sıcaklıklarda önemli ölçüde bozulduğunu, buna karşılık MF tutkalların yapısal bütünlüğünü koruduğunu raporlamıştır (Wiesner ve diğ., 2021). Bu durum, kullanım ortamına bağlı olarak uygun tutkal türünün dikkatle seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Klippel ve arkadaşları, yangına dayanım konusunda gerçekleştirdikleri araştırmada PRF tutkalların yangın koşullarında PUR ve diğer tutkal türlerine kıyasla daha düşük arıza riski taşıdığını belirtmiştir (Klippel ve diğ., 2011). Bu bulgular, yapı uygulamalarında güvenlik açısından tutkalların yalnızca mekanik özelliklerine değil, aynı zamanda termal kararlılıklarına ve yangın altındaki davranışlarına göre değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Farklı tutkal türleri, çevresel etkenlere karşı değişen dayanıklılık özellikleri sergilemektedir. Li ve arkadaşları, PRF tutkalının farklı odun türlerine göre PUR tutkala kıyasla daha iyi yapışma performansı ve dayanıklılık sunduğunu belirtmiş ve tutkalın ahşap türüyle olan uyumunun istenen performansa ulaşmak için kritik olduğunu vurgulamıştır (Li ve diğ., 2021). Özellikle değişken çevresel koşullara maruz kalan uygulamalarda, ÇLK’da kullanılan tutkalların rutubete karşı gösterdiği direnç büyük önem taşımaktadır. Çalışmalar, tutkalın rutubet direncinin yapışma performansı ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini, çünkü birçok arızanın rutubet girişine bağlı delaminasyon kaynaklı olduğunu göstermektedir (Yusof ve diğ., 2019).

Sonuç olarak, kullanılan tutkal türü; ÇLK’nın mekanik performansı, dayanıklılığı, sıcaklık direnci ve yangın güvenliği üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Mevcut literatür, PRF tutkalların farklı gerilme koşulları altında daha yüksek yapışma kalitesi ve kararlılık sunduğunu, dolayısıyla üstün performans için tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir. PUR tutkallar ise bazı avantajlara sahip olsa da yüksek sıcaklık ve nem koşullarında performans sınırlılıkları gösterebilmektedir. Yapı sektörü ÇLK’yı daha yaygın şekilde benimsedikçe, tutkal türlerinin ve uygulama yöntemlerinin optimize edilmesine yönelik araştırmalar büyük önem taşımaktadır. Yerel formülasyonların ve farklı odun türleriyle olan etkileşimlerinin araştırılması, ÇLK uygulamalarında daha dayanıklı ve özelleştirilmiş çözümler

geliştirilmesini sağlayarak daha güvenli ve verimli yapı uygulamalarının önünü açacaktır.

2.1.4 ÇLK Malzemelerde Pres Basıncı ve Süresinin Etkisini Analiz Eden Çalışmaların Literatür Özeti

ÇLK, sürdürülebilirliği, yapısal performansı ve estetik avantajları nedeniyle çevre dostu bir yapı malzemesi olarak önemli ölçüde öne çıkmıştır. ÇLK'nın üretim süreci; tutkal türü ile birlikte uygulanan basınç ve kürleşme süresi gibi kritik parametreleri de içerir ve bu parametreler bir arada malzemenin mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını doğrudan etkiler. ÇLK üretiminde uygulanan basınç ve zamanın etkilerini inceleyen güncel araştırmalar aşağıda verilmiştir.

ÇLK üretiminde lamine katmanlar arasında uygulanan tutkal basıncı, yapışma kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Li ve arkadaşları, farklı odun türlerinden üretilen ÇLK panellerde pres basıncının artırılmasının kayma dayanımını anlamlı şekilde yükselttiğini bildirmiştir (Li ve diğ., 2021). Daha yüksek basınç, daha düşük delaminasyon oranları ve daha yüksek kırılma yüzdeleri ile sonuçlanmış ve bu durum güçlü bir yapışma kalitesine işaret etmiştir. Araştırmada, optimal basınç seviyelerinin tutkal türüne ve ahşap türüne göre özelleştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Yüksek basınç, tutkalın odun liflerine daha derinlemesine nüfuz etmesini sağlayarak daha sağlam bağlantılar oluşturmuştur. Benzer şekilde Yang ve arkadaşları, göknar ile üretilen ÇLK panellerin yapışma kalitesini ve dayanıklılığını incelemiş ve tutkal türü ile uygulanan basıncın odun kırılma yüzdesi ve delaminasyon davranışı üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir (Yang ve diğ., 2022). Özellikle poliüretan (PUR) tutkalların, yüksek basınç altında daha etkili performans sergilediği belirlenmiştir. Bu da basıncın ÇLK üretiminde kritik bir değişken olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, Silva ve arkadaşlarının yaptığı çalışma, Brezilya'ya özgü farklı ağaç türlerinden üretilen ÇLK panellerde uygulanan bağlayıcı basıncın tutkal performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir (Silva ve diğ., 2023). Çalışmada, 0,7 MPa basıncın en iyi yapışma kalitesini sağladığı, daha düşük basınçlarda ise delaminasyon ve yapışma hatalarının arttığı görülmüştür. Bu da güvenilir yapışma için yeterli basıncın sağlanmasının önemini vurgulamaktadır.

ÇLK üretiminde tutkalın kürleşme süresi, yapısal bütünlüğün sağlanması açısından en az basınç kadar önemlidir. Kürleşme süresinin yeterli olması, tutkal bağlantılarının dayanım ve uzun vadeli performansını önemli ölçüde artırır. Zamanın sınırlı tutulması ise tutkalın tam polimerizasyonuna engel olarak laminasyonun bütünlüğünü zayıflatabilir (Harte, 2017). Harte, kürleşme süresinin uygun olmaması durumunda odunun nem içeriğinin de etkilenebileceğini, bunun ise boyutsal kararsızlığa, eğilme ve çatlama gibi sorunlara yol açabileceğini belirtmiştir (Harte, 2017). Tutkalın kürleşme süresi ile ahşabın nem içeriği arasındaki etkileşim, üretim sürecini daha da karmaşık hale getirmekte ve kürleşme aşamasında çevresel koşulların hassasiyetle kontrol edilmesini gerektirmektedir. Kukk ve arkadaşlarının araştırması, pres süresinin etkilerini incelemiş ve kısa pres sürelerinin tutkalın odun liflerine yeterince nüfuz etmesini engellediğini göstermiştir (Kukk ve diğ., 2019). Bu durum, katmanlar arasında yeterli bağ oluşmamasına ve panelin yük altında beklenen performansı gösterememesine neden olmaktadır. Dolayısıyla, üretimde yeterli pres süresi sağlanmalıdır.

Sonuç olarak hem basınç hem de süre, ÇLK'nın yapışma kalitesi, mekanik özellikleri ve genel yapısal performansı üzerinde kritik etkilere sahiptir. Pres basıncının artırılması, yapışma dayanımını güçlendirmekte, delaminasyonu azaltmakta ve dayanıklılığı artırmaktadır. Öte yandan, tutkalın maksimum performansına ulaşabilmesi için yeterli kürleşme süresi sağlanmalı ve üretim süresi dikkatle izlenmelidir. Gelecekteki çalışmalar, bu parametrelerin farklı odun türleri ve tutkal tipleri için optimize edilmesine odaklanmalı; böylece ÇLK'nın çeşitli yapı uygulamalarında daha güvenilir ve etkili biçimde kullanılmasının önü açılmalıdır. Basınç, süre ve tutkal etkileşimi arasındaki ilişkinin detaylı biçimde ele alındığı kapsamlı araştırmalar, ÇLK üretim stratejilerinin ve nihai ürün performansının daha ileri düzeyde geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

2.1.5 ÇLK Malzemelerin Sonlu Elemanlar Analizini İnceleyen Çalışmaların Literatür Özeti

ÇLK malzemelerde sonlu elemanlar analizinin (SEA) uygulanması, yapısal davranışın doğru bir şekilde modellenmesi amacıyla geniş çapta araştırılmıştır. Martínez-Martínez ve diğ. (2018), ÇLK panellerin dik yükler altındaki deformasyon ve göçme mekanizmalarını öngörmek amacıyla bir sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımı

geliştirmiştir. Çalışmada, odunun anizotropik doğasının doğru şekilde modellenmesinin ve katmanlar arası etkileşimlerin karmaşıklığının dikkate alınmasının, yapısal performansın hassas tahminleri açısından kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır. Buna ek olarak, Albostami ve diğ. (2021), hem sonlu elemanlar analizi hem de analitik yöntemler kullanarak ÇLK panellerin elastik tepkisini incelemiş ve ahşap kompozitlerin karmaşık davranışlarının anlaşılmasında nümerik modellemenin etkinliğini pekiştirmiştir.

SEA'nin, ÇLK'nın mekanik davranışlarını öngörmedeki doğruluğu, deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Örneğin, Akter ve diğ (2021), ÇLK duvar-zemin bağlantılarına ilişkin sonlu elemanlar tahminlerini deneysel bulgularla karşılaştıran bir nümerik çalışma yürütmüş ve bu yöntemin, lif doğrultusuna dik basınç altında bağlantı rijitliği ve dayanımını değerlendirmedeki güvenilirliğini ortaya koymuştur. Sayısal simülasyonlar ile deneysel veriler arasındaki bu uyum, sonlu elemanlar analizinin ÇLK uygulamalarında güvenilir bir tasarım aracı olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır.

Yapısal performans değerlendirmelerine ek olarak, SEA, kritik tasarım parametreleri üzerinde duyarlılık analizleri gerçekleştirmek için de etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Shahnewaz ve diğ. (2019), FEA kullanarak ÇLK kesme duvarlarının yatay performansını incelemiş; açıklık boyutu ve konumunun duvarların kesme rijitliği üzerindeki etkilerini analiz etmek üzere modeller geliştirmiştir. Bu çalışma, tasarım tercihlerinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini öngörme noktasında SEA'nın yetkinliğini ortaya koymakta ve ÇLK tasarımlarını optimize etmek isteyen mühendisler için değerli bir rehber sunmaktadır.

Lakušić (2022) ise, eğilme performansını değerlendirmek amacıyla hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemlerini uygulayarak, maliyet etkin hibrit ÇLK döşemelerin tasarımında FEA'nın rolünü daha da vurgulamıştır. Bu çalışma, FEA'nın yalnızca performans doğrulamasında değil, aynı zamanda tasarım optimizasyonunda da önemli katkılar sağladığını ve hibrit yapıların hem ekonomik hem de yapısal açıdan güvenli olmasını temin ettiğini göstermektedir.

Hibrit CLT panelleri (dış tabakalarında yüksek kalitede ve çekirdek kısmında düşük kaliteli ağacın kullanıldığı) için kullanılan metal bağlantı elemanlarının (çiviler ve vidalar) histeretik (döngüsel yükleme) davranışını incelemektedir. WCTE 2016

konferansı kapsamında geliştirilen test programında, farklı doğrultularda uygulanan modifiye edilmiş CUREE döngüsel yükleme protokolü ile iki bağlantı tipi değerlendirilmiş; yüksek/yoğun ve düşük/düşük yoğunluklu ahşap katmanlardan oluşan hibrit CLT ile geleneksel CLT paneller arasında bağlantı davranışı açısından bazı koşullarda istatistiksel olarak anlamlı farklar gözlemlenmiştir. Ancak bazı durumlarda yüzey tabakasında ya da bağlantı elemanlarında hasar oluştuğunda, hibrit ve geleneksel paneller arasında belirgin bir fark bulunmamıştır. Bu bulgular, CLT bağlantılarında ahşap türü ve yoğunluğun özellikle döngüsel dayanım üzerinde kritik rol oynadığını göstermektedir (MahdaviFar ve diğ., 2017).

Odun mikroyapısının radyal tanjansiyel (RT) düzlemindeki anizotropik yapısının (RT plane) tanecik çatlamasına etkisini inceleyerek, yığılmış kiriş elemanlar içeren iki boyutlu bir discrete element model (DEM) geliştirmiştir. Moleküler Dinamik yaklaşımını kullanan simülasyonlar ile RT yönünde yükleme altında hasar evrimi takip edilmiş ve elde edilen sayısal sonuçlar, ladin ağacına ait deneysel verilere oldukça iyi şekilde uymuştur. Çalışma, hücresel ve mikro yapı malzemelerde çatlama ve hasar yayılımını modellemek için DEM yönteminin uygulanabilirliğini ve güvenilirliğini ortaya koymaktadır (Wittel ve diğ., 2004).

2.2 Araştırma Boşluğu

Hibrit ÇLK malzemenin yapısal performansı, dayanıklılığı ve ekonomik uygulanabilirliği açısından geleneksel yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında karşılaşılan zorluklara odaklanmaktadır. Farklı ağaç türleri ve malzemelerin bir araya getirilmesiyle yapısal kapasitenin optimize edilmesini amaçlayan hibrit ÇLK sistemlerine yönelik ilgi giderek artsa da, çeşitli teknik zorluklar bu sistemlerin inşaat sektöründe yaygın olarak benimsenmesini engellemektedir.

Bu zorluklardan en önemlilerinden biri, hibrit ÇLK yapıların mekanik performansı ile ilgilidir. Ahmed ve diğ. (2023) tarafından yapılan araştırmalar, hibrit ÇLK'nin eğilme özelliklerinin, kullanılan ağaç türü seçimi ve yapıştırıcı bağlarının yönelimine bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceğini ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle farklı yükleme koşullarında performans tutarlılığı açısından endişe yaratmakta olup, gerçek uygulamalarda bu yapı bileşenlerinin yapısal güvenilirliğini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Buna ek olarak, ÇLK'nin çapraz katmanlarında düzlem dışı yükleme altında meydana gelen yuvarlanma kesme (rolling shear) hasarı, tasarım sürecini daha

karmaşık hale getirmektedir (Rahman ve diğ., 2020; Niederwestberg ve diğ., 2018). Bu tür zayıflıklar, malzemenin dayanıklılığını artıracak yenilikçi tasarım yaklaşımlarına ve yapı yönetmelikleriyle uyumlu çözümlere olan ihtiyacı gündeme getirmektedir.

Bunun yanı sıra, hibrit ÇLK'nin ekonomik yönü de dikkate alınması gereken bir diğer karmaşık boyutu temsil etmektedir. Markavic (2022), özellikle farklı kalitede katmanların kullanıldığı tasarımlarda, maliyet etkinliğinin ön planda tutulduğunu vurgulamaktadır. Ancak bu malzemelerin üretim maliyetleri ve performans artırıcı potansiyel modifikasyonlar, geliştiricilerin hibrit çözümleri tercih etmelerini zorlaştırabilecek bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Brandt ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmalar da, hibrit ÇLK'nin üretim süreçlerine ilişkin kapsamlı teknoloji-ekonomi analizlerinin eksikliğinin, sektör genelinde karar alma süreçlerini ve politika oluşturmaya olumsuz etkilediğine işaret etmektedir.

Ayrıca, kritik koşullar altındaki performans – özellikle yangın dayanımı – hibrit ÇLK sistemleri açısından önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Wang ve diğ. (2019), çapraz lamine ahşap malzemelerin yangına karşı performansına ilişkin belirsizliklerin, bu sistemlerin yüksek riskli uygulamalarda kabul edilebilirliğini etkileyebileceğini belirtmektedir. Tüm yapı malzemeleri için temel bir güvenlik kriteri olan yangın güvenliği konusu, hibrit ÇLK'nin kabulü ve yaygınlaştırılması açısından mutlaka ele alınması gereken bir husustur. Bu sorunların etkileşimi, kapsamlı ve bütüncül bir problem alanı yaratmakta olup, bu alandaki ilerleme; koordineli araştırma çalışmaları, düzenleyici çerçeveler ve sektör iş birlikleri aracılığıyla mümkün olabilecektir.

Sonuç olarak, hibrit çapraz lamine ahşabın gelişimini engelleyen başlıca faktörler arasında tutarsız mekanik performans, ekonomik sürdürülebilirlik ve yangın güvenliğine dair endişeler yer almaktadır. Bu nedenle, güvenilirliği sağlayan, piyasa cazibesini artıran ve sürdürülebilir yapı uygulamalarını teşvik eden hibrit ÇLK konfigürasyonlarının optimize edilmesine yönelik odaklanmış araştırma ve geliştirme faaliyetleri büyük önem arz etmektedir.

2.3 Araştırmanın Amacı, Hedefleri ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının temel amacı, hibrit ÇLK sistemlerinin yapısal performans açısından mevcut sınırlılıklarını analiz ederek, bu malzemenin yapı sektöründeki

potansiyelini artıracak çözüm önerileri geliştirmektir. Bu doğrultuda, uludağ göknarı, ladin ve kavak gibi farklı odun türlerinin ve katman kalınlığının mekanik davranış üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenecektir. Bu kapsamda yürütülecek araştırma ile, hibrit ÇLK sistemlerinin daha güvenilir hem de uygulamaya dönük yapı sektörüne katkı sağlanması hedeflenmektedir.

Bu araştırma kapsamında aşağıdaki hedeflere ulaşılması amaçlanmaktadır:

- Hibrit ÇLK sistemlerinde kullanılan farklı ahşap türlerinin mekanik performansa etkisini değerlendirmek.
- Hibrit ÇLK sistemlerinde kullanılan farklı katman kalınlığının mekanik performansa etkisi değerlendirilecektir.
- Malzemelerin eğilme direnci, elastikiyet modülü, kayma modülü, vida tutma kapasitesi, çekmede makaslama direnci, basma dayanımı ve hafifliği için karşılaştırmalı analiz yapılacaktır.
- Eğilme özelliklerinin deneysel ve numerik analizler ile karşılaştırılmasıdır.
- Düşük yoğunluk ve düşük mukavemetli kavak türünün ÇLK yapı malzemelerinde kullanılabilirliği.
- Sürdürülebilir ve yenilenebilir malzeme kullanımı ile yaşam şartlarını iyileştirme.
- Farklı malzeme kombinasyonlarının mekanik performansa etkisinin belirlenmesi.
- Deneysel verilerin sayısal modellerle doğrulanması ve bu modellerin hibrit ÇLK tasarımlarına uygulanabilirliğinin incelenmesi.

Bu çalışma, hibrit ÇLK sistemlerinin yapısal performans açısından değerlendirilmesini kapsamaktadır. Araştırma kapsamında, farklı odun türleri ve katman kalınlığının mekanik özellikler üzerindeki etkileri deneysel, numerik ve literatür temelli analizlerle incelenecektir.

Çalışma, özellikle malzemelerin eğilme direnci, elastikiyet modülü, kayma modülü, vida tutma kapasitesi, çekmede makaslama direnci, basma dayanımı ve hafifliği için karşılaştırmalı analiz yapılacaktır. Araştırmanın kapsamı, yalnızca ahşap esaslı hibrit sistemlerle sınırlıdır; diğer kompozit malzemeler (örneğin beton-ahşap hibritleri) bu çalışmanın dışında bırakılmıştır. Ayrıca, yapı ölçeğindeki mimari ve estetik

değerlendirmeler değil, malzeme ölçeğindeki yapısal ve teknik performans değerlendirmeleri esas alınmıştır.

2.4 Çalışmanın Hipotezi ve Araştırma Soruları

Bu tez çalışmanın hipotezi;

H_0 : Farklı odun türlerinin ve katman kalınlığının ÇLK malzemesinin mekanik özellikleri üzerine etkisi vardır.

H_a : Farklı odun türlerinin ve katman kalınlığının ÇLK malzemesinin mekanik özellikleri üzerine etkisi yoktur.

Bu bağlamda aşağıdaki araştırma soruları önem kazanmıştır.

- Hibrit ÇLK sistemlerinde farklı ahşap türlerinin kullanımı, malzemelerin eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, kayma modülü, vida tutma kapasitesi, çekmede makaslama direnci, basma dayanımı ve hafifliği üzerinde nasıl bir etki yaratmaktadır?
- Hibrit ÇLK sistemlerinde farklı katman kalınlığı kullanımı, malzemelerin eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, kayma modülü, vida tutma kapasitesi, çekmede makaslama direnci, basma dayanımı ve hafifliği üzerinde nasıl bir etki yaratmaktadır?
- Hibrit ÇLK sistemlerinde farklı odun türü ve katman kalınlığı kullanımı ile malzemelerin sonlu elmanlar analizi bazı mekanik özellikleri tahmin edilebilir mi?

2.5 Çalışmanın Önemi

Hibrit ÇLK üzerine yapılan çalışmaların önemi, inşaat uygulamalarında devrim yaratma potansiyelinden, yapısal performansı artırma yeteneğinden ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunma kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Hibrit ÇLK, farklı ağaç türlerinin bir arada kullanılması ya da bambu, cam gibi alternatif malzemelerin entegre edilmesiyle, geleneksel ahşap malzemelerin sınırlılıklarını aşmaya yönelik yenilikçi çözümler sunarken, aynı zamanda yenilenebilir kaynakların etkin kullanımını da sağlamaktadır.

Öncelikle, hibrit ÇLK'nin mekanik özellikleri üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Ahmed ve diğ. (2023) tarafından yürütülen çalışmalar, farklı ağaç türü kombinasyonlarının eğilme dayanımı ve genel yapısal dayanıklılık üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalar, bağ yöneliminin mekanik performans üzerinde belirleyici bir rol oynadığını vurgulamakta ve tasarım aşamasında malzeme seçiminin önemine dikkat çekmektedir. Ayrıca, Galih ve diğ. (2020) bambunun çekirdek tabaka olarak kullanılmasının ÇLK'nin mekanik özelliklerini geliştirdiğini ortaya koymuş, bu da hibrit tasarımların geleneksel ahşap performansını karşılayabileceği hatta aşabileceği yönündeki görüşü desteklemiştir. Bu uyarlanabilirlik, daha düşük yoğunluklu ağaçların kullanılmasına olanak tanıyarak malzeme maliyetlerini ve çevresel etkiyi azaltırken yapısal bütünlüğün korunmasını sağlayabilir.

Buna ek olarak, hibrit ÇLK enerji verimliliği ve sürdürülebilir bina tasarımı açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Salonvaara ve Desjarlais (2024), hibrit ÇLK kullanılan yapılarda enerji tüketimi ve karbon salımının beton gibi geleneksel malzemelere kıyasla önemli ölçüde azaltılabildiğini ortaya koymuştur. Bezabeh ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmalar da, hibrit çelik yapı sistemlerine ÇLK'nin entegre edilmesinin sismik performansı artırarak kaynak verimliliğine katkı sağladığını göstermektedir. Bu bulgular, hibrit ÇLK'nin hem yapısal performansı artırma hem de çevre dostu çözümler üretme açısından çift yönlü fayda sağladığını ortaya koymaktadır.

Hibrit ÇLK'nin maliyet-etkin tasarım yaklaşımları da bu malzemenin önemini artırmaktadır. Markovic (2022), farklı kaliteye sahip ağaç katmanlarının birlikte kullanılmasıyla daha düşük maliyetli panellerin üretilebildiğini ve bu sayede ÇLK sistemlerine daha kolay erişebildiğini vurgulanmaktadır. Bu durum, hibrit ÇLK'nin daha geniş bir pazarda benimsenmesine olanak tanımakta ve farklı yapısal bağlamlarda kullanımını teşvik etmektedir.

Ayrıca, gelişmiş teknolojiler ve yeni malzemelerin dahil edildiği hibrit çözümler de umut verici gelişmeler sunmaktadır. Rajčić ve diğ. (2020), hibrit ÇLK ve cam cephelerin ısı ve enerji performanslarını inceleyen çalışmalarında, bu sistemlerin bina estetiğini ve enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Bu tür yenilikçi tasarımlar, hibrit ÇLK'nin modern inşaat uygulamalarındaki yerini sağlamlaştırmakta, estetik ve işlevselliği aynı anda karşılamaktadır.

Sonuç olarak, hibrit çapraz lamine ahşap üzerine yapılan çalışmalar, mühendislik uygulamaları ve çevresel sürdürülebilirlik açısından çok yönlü bir öneme sahiptir. Mekanik zelliklerin iyileştirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve maliyet-etkin tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi yoluyla hibrit LK, gelecekte daha sürdürülebilir ve dayanıklı yapı uygulamalarına önemli katkılar sağlayabilecek bir yapı malzemesi olarak öne çıkmaktadır.



3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, ÇLK malzemesi için elde edilecek olan masif malzemeler Bursa Orman Ürünleri Sanayisi Bölgesinden temin edilmiştir. Çalışma kapsamında Uludağ göknarı (*Abies bornmülleriana* Mattf.), Ladin (*Picea orientalis* L.) ve Kanada kavağı (*Populus canadensis*) odunlarından elde edilen elemanlar ÇLK’da kullanılmıştır. Ladin ve Gökmar odunun tercih edilmesinin nedeni, ahşap yapı sektöründe Gökmar ve Ladin (SPF) odun türlerinin kuzey Amerika’da sıklıkla kullanılması ve EUROCODE 5 kapsamında bu odun türlerinin yapısal sınıflandırılması için çalışmaların gündemde olmasından dolayı seçilmiştir. Kavak odunu ise ahşap yapı sektörü için katma değeri düşük olan ve ahşap yapı sektöründe tercih edilmeyen bir tür olsa da çalışma kapsamında bu odun türünden elde edilecek olan ÇLK’ların yapısal sınıfları değerlendirilecek ve direnç/yoğunluk karşılaştırılmasıdır.

Çalışma kapsamında, katman kalınlıkları ve odun türleri açısından farklı kombinasyonlarla üretilen ÇLK panellerin bazı mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu doğrultuda, Şekil 3.1’de gösterildiği üzere, katmanlarda kullanılan odun türü (3 farklı tür) ve katman kalınlığı (2 farklı ölçü) faktörleri dikkate alınmış; toplamda 14 farklı örnek grubu oluşturulmuştur. Her grup için deneyler beşer tekrar yapılarak, elde edilen sonuçların istatistiksel güvenilirliği sağlanmıştır.

Şekil 3.1’de çalışmanın deney tasarımı görülmektedir. Deneyisel çalışmalarda üç katmandan oluşan Çapraz Lamine Kereste (ÇLK) paneller kullanılmıştır. Katmanlarda farklı odun türleri ve kalınlık kombinasyonları uygulanarak üç ana örnek grubu oluşturulmuştur: **Kontrol**, **Hibrit-I** ve **Hibrit-II**. Kontrol grubunda her üç katmanda da aynı tür odun kullanılmış olup L-L-L, G-G-G ve K-K-K düzenleri uygulanmıştır. Hibrit-I grubunda katmanlar arasında farklı tür kombinasyonlarına yer verilmiş; örneğin G-K-G ve L-K-L dizilimleri kullanılmıştır. Hibrit-II grubunda ise daha karmaşık kombinasyonlar tercih edilerek L-K-G ve G-K-L düzenleri elde edilmiştir. Katman kalınlıkları iki farklı ölçüyle belirlenmiş; **18×18×18 mm** eşit kalınlıktaki kombinasyonlar ile **20×14×20 mm** değişken kalınlıktaki kombinasyonlar değerlendirilmiştir. Böylelikle, hem odun türü hem de katman kalınlığı faktörleri

dikkate alınarak toplam **14 farklı örnek grubu** oluşturulmuş ve her grup için 5 tekrarlı deney gerçekleştirilmiştir.

Örnek Grubu	Odun Türü	Katman Kalınlığı
	Katman 1-2-3	Katman 1-2-3
Kontrol	L-L-L G-G-G K-K-K	18 × 18 × 18 mm
Hibrit-I	L-K-L G-K-G	20 × 14 × 20 mm
Hibrit-II	L-K-G G-K-L	

L: Ladin, G: Gökmar ve K: Kavak

Şekil 3.1: Katmanlarda kullanılan odun türü ve katman kalınlığı parametreleri.

3.1 ÇLK Malzemelerinin Hazırlanması

Çalışma kapsamında, kerestelerin kusurlarının giderilmesi için farklı boyutlarda hazırlanan parçalar Çizelge 3.1’de verilmiştir. Parçalar önce yan yana 200 gr/m² poliüretan (PÜ) tutkalı kullanılarak işkence yardımıyla birleştirilerek en az 8 saat kürleşme süresinde bekletilmiştir.

3 katmanlı olarak hazırlanacak olan ÇLK işleminde PÜ tutkalı 200 gr/m² miktarında birleşecek katman yüzeylerine homojen bir şekilde sürülmüştür ve katmanlar birbirlerine 90°’lik açı yapacak şekilde 3 katman olarak prese hazır getirilmiştir. 54 x 400 × 1100 mm boyutlarında olan ÇLK malzemeler 1200 × 2500 mm Cemil Usta Sıcak pres altında ve 54 × 500 × 600 mm boyutlarındaki ÇLK malzemeler ise 7 atm basınç altında 150 dakika preslenmiştir Çalışma kapsamında 14’şar adet 54 × 500 × 600 ve 54 × 400 × 1100 boyutlarında ÇLK’ları hazırlamak için kullanılan net kereste miktarları 248,64 dm³ göknar, 248,64 dm³ ladin ve 264,92 dm³ kavak odunu olmak üzere 1.010,84 dm³ kullanılmıştır.

Çizelge 3.1: Katmanlarda kullanılan parça boyutları (mm).

Deney tipi	Katman	Kalınlık	Genişlik × uzunluk
4 nokta eğme	Alt ve üst	18 ve 20 mm	100 × 1100
	Orta	14 ve 18 mm	100 × 400
3 nokta eğme – basma – vida tutma	Alt ve üst	18 ve 20 mm	100 × 600
	Orta	14 ve 18 mm	100 × 500



Şekil 3.2: ÇLK'ların hazırlanma süreci.



Şekil 3.3: 54 x 400 x 1100 mm ÇLK'ların preslenmesi.

3.1.1 Yoğunluk ve rutubet miktarının belirlenmesi

Masif malzemeler için eğilme demeyi örneklerinden ASTM D 143 – 94 standardına göre $25 \times 25 \times 25$ mm (radyal $\times$ teğet $\times$ boyuna) boyutlarında ve ÇLK malzemesi için de TS EN 408'e göre 4 nokta eğme deneyi örneklerinden $54 \times 70 \times 50$ mm (T $\times$ W $\times$ L) boyutlarında deneyler sonrasında örnekler alınmıştır. Yoğunluk tayini için denklem 1 kullanılmıştır. Hem masif hem de ÇLK malzemeleri için örnekler en az 72 saat boyunca 103 ± 2 derece kurutularak rutubet miktarının tayini için de denklem 2 kullanılır.

$$\rho = \frac{\omega}{V} \quad (1)$$

Burada, ρ malzemelerin yoğunluğu (gr/cm³), ω malzemelerin ağırlığı (gr) ve V ise malzemelerin hacmidir (cm³).

$$RM = \frac{\omega_{12} - \omega_0}{\omega_0} \times 100 \quad (2)$$

Burada, RM malzemelerin rutubet miktarı (%), ω_{12} malzemelerin deney şartlarındaki rutubetli ağırlı (gr), ω_0 ise malzemelerin kurutulduktan sonraki ağırlıdır (gr).

3.1.2 Masif ve ÇLK malzemelerin eğilme direnci ve elastikiyet modülünün belirlenmesi

ASTM D143-94 standardına göre Gökmar, Ladin ve Kavak odunlarından elde edilen $25 \times 25 \times 410$ mm boyutlarında masif örnekler Şekil 3.4a'da belirtildiği gibi 3 nokta eğme testi için SHIMATSU test cihazına yerleştirilmiştir. Statik eğilme testi dakikada 10 mm hız ile örneklerde kırılma meydana gelene kadar devam ettirilmiştir. Test sonucu olarak yük- yer değiştirme eğrisi elde edilerek, örneklerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü sırası ile denklem 3 ve 5'e göre hesaplanacaktır.



(a)



(b)

Şekil 3.4: Malzemelerin eğilme özellikleri için deney düzenekleri a. Masif- 3 nokta eğme ve b. ÇLK- 4 nokta eğme.

TS EN 408 standardına göre ÇLK malzemesi eğilme direnci ve elastikiyet modülünün belirlenmesi için örnekler 4 nokta eğme deneğine maruz bırakılmıştır (Şekil 3.4b). Deney örneklerinin $54 \times 70 \times 1100$ mm boyutlarında hazırlanmış olup destek noktaları arasındaki mesafe 900 mm ve yükleme noktaları arası mesafe 300 mm'dir. Statik eğilme deneyinde yük başlığı 15 mm/dk hız ile uygulanmıştır. Deney, maksimum kırılma yüküne ulaşma hızında devam ettirilmiştir. Test sonucu olarak yük- yer değiştirme eğrisi elde edilerek, örneklerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü sırası ile denklem 4 ve 6'e göre hesaplanmıştır.

$$ED_{masif} = \frac{3 \times F_{maks} \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (3)$$

$$ED_{ÇLK} = \frac{F_{maks} \times L}{b \times h^2} \quad (4)$$

Burada, ED_{masif} ve $ED_{ÇLK}$ sırası ile masif ve ÇLK malzemelerin eğilme dayanımı (MPa), F_{maks} deney sırasında elde edilen maksimum yük miktarı (N), L destek noktaları arasındaki açıklık (mm), b örnek enine kesit genişliği (mm) ve h ise örnek enine kesit yüksekliğidir (mm).

Burada, EM_{masif} ve $EM_{\text{ÇLK}}$ sırası ile masif ve ÇLK malzemelerin elastikiyet modülü (MPa), a yükleme noktasının destek noktasına uzaklığı (mm), L_1 yükleme noktaları arası açıklık (mm), ΔF elastik bölgede bulunan iki kuvvet arası fark (N), Δd bu iki kuvvet noktası karşılığında oluşan deformasyonların farkı (mm) ve I ise atalet momenttir (mm^4).

$$EM_{masif} = \frac{\Delta F \times L^3}{4 \times \Delta d \times b \times h^3} \quad (5)$$

$$EM_{\text{ÇLK}} = \frac{\Delta F \times a \times L_1^2}{16 \times \Delta d \times I} \quad (6)$$

3.1.3 ÇLK malzemesinin kayma modülünün belirlenmesi

TS EN 408 standardına göre $54 \times 70 \times 378$ mm ÇLK örneklerine Şekil 3.5'te verilen deney düzeneğinde 7,5 mm/dk hız ile yük uygulanacak olup meşru elastikiyet modülü denklem 7'e göre hesaplanmıştır. Malzemelerin kayma modülü ise eşitlik 8 ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.5: Kayma modülü tayini için deney düzeneği.

$$EM_{app} = \frac{\Delta F \times L^3}{4 \times \Delta d \times b \times h^3} \quad (7)$$

$$G = \frac{k_G \times h^2}{L_1^2 \times \left[\frac{1}{EM_{app}} - \frac{1}{EM_{CLK}} \right]} \quad (8)$$

Burada, EM_{app} malzemelerin meşru elastikiyet modülü (MPa), G malzemelerin kayma modülü (MPa) ve k_G ise dikdörtgen enine kesitler için 1,2 katsayısıdır.

3.1.4 ÇLK malzemelerin yuvarlama kesme dayanımının belirlenmesi

Malzemelerin yuvarlama kesme dayanımı EN 16351 standardına göre 4 nokta eğme deneyi sonucu elde edilen veriler ile denklem 9'a göre hesaplanmıştır.

$$f_r = \frac{3 \times F_{maks}}{4 \times t \times b} \quad (9)$$

Burada, f_r yuvarlama kesme dayanımı (MPa), F_{maks} eğme deneyinde elde edilen maksimum kuvvet (N), t örnek kalınlığı (mm) ve b ise örneğin genişliğidir (mm).

3.1.5 Masif ve ÇLK malzemelerin basma dayanımı

ASTM D143-94 standardına göre, Göknar, Ladin ve Kavak odunlarından elde edilen $25 \times 25 \times 100$ mm boyutlarında örnekler liflere paralel basma testi için SHIMATSU Universal Test Cihazında dakikada 0,3 mm hız ile kırılma meydana gelene kadar yük uygulanmıştır. Test sonucu olarak yük- yer değiştirme eğrisi elde edilerek örneklerin liflere paralel yönde basma direnci ile eşitlik 10'a göre hesaplanmıştır.

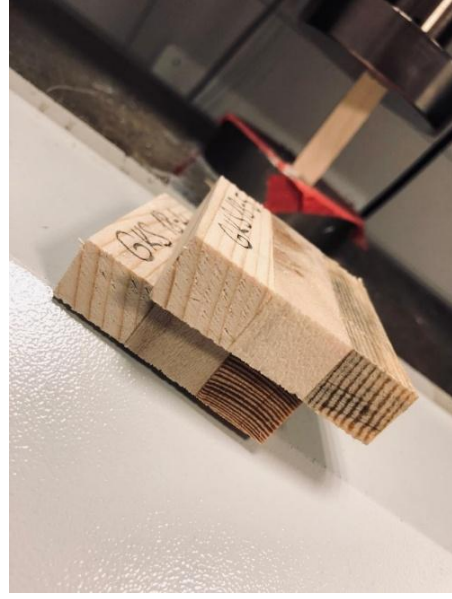
ÇLK'ların liflere paralel basma dayanımı TS EN 408 standardına göre belirlenecektir. Enine kesit boyutları 15×54 mm olarak alınan örneklerin uzunluğu ise basma deneyinde burkulmayı önlemek için enine kesitteki dar kenarın en fazla 4 katı uzunlukta (60 mm) olmuştur. ÇLK'ların maksimum basma dayanımı SHIMADZU Universal Test Cihazında 2 mm/dk yükleme hızı ile dış katmanların lif yönüne paralel olacak şekilde uygulanacaktır (Şekil 3.7). Örneklerin liflere paralel basma dayanımı denklem 10 ile hesaplanacaktır.

$$f_b = \frac{F_{maks}}{t \times b} \quad (10)$$

Burada, f_b malzemenin basma dayanımı (MPa), t örneklerin enine kesit kalınlığı (mm) ve b ise örneklerin enine kesit genişliğidir (mm)

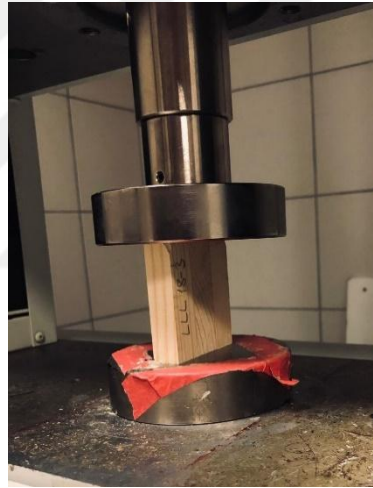


(a)



(b)

Şekil 3.6: a. 54x70x216 mm ve b. 15x54x60 mm ÇLK örnekleri.



Şekil 3.7: ÇLK basma deneyi düzeneği.

3.1.6 Masif ve ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesinin belirlenmesi

ÇLK'ların vida tutma kapasitesini belirlemek için 6×70 mm vidalar kullanılarak vidalar 3 katmanlı ÇLK malzemesine ilk 2 katmana penetre edilerek vidalanmıştır. Proje önerisinde 7×100 mm boyutlarında vidalar ve 3 katmana da penetrasyon planlanmasına rağmen deney düzeneğinin uygun olmaması nedeniyle testler yapılmamıştır (Şekil 2.8c ve d). $54 \times 50 \times 50$ mm ($T \times W \times L$) boyutlarında hazırlanan numuneler Şekil 3.8a'da belirtildiği gibi hazırlanmıştır. Vida kılavuz çapı ve değinliği sırası ile vida çağı ve uzunluğunun %80'idir. Tüm testler SHIMADZU Universal Test Cihazında TS EN 13446 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test örnekleri Şekil 3.8b'de gösterildiği gibi vida yönüne paralel statik yükleme ile çekme kuvveti uygulanmıştır.

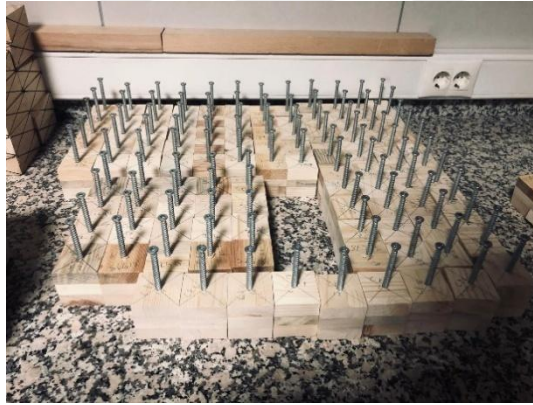
Deney sonucunda ÇLK'nın maksimum vida tutma kapasitesi ile denklem 11 ile hesaplanmıştır.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.8: a. 6 × 70 mm vida çekme örneği, b. Vida çekme test düzeneği, c. 7 × 100 mm vidalama ile hazırlanan örnekler ve d. 7 × 100 mm vida ile 3 katman penetre vidalama örnekleri.

$$f = \frac{F_{maks}}{2 \times \pi \times r \times d} \quad (11)$$

Burada, f malzemelerin maksimum vida tutma kapasitesi (MPa), F_{maks} maksimum vida tutma kuvveti (N), r vida dış yarıçapı (mm) ve d ise vida penetrasyon derinliği (mm)

3.1.7 Bindirme kayma dayanımının belirlenmesi

Malzemelerin bindirme kayma dayanımı için G-G, L-L, K-K, G-L, G-K ve L-K kombinasyonlarında parçalar PÜ tutkalı (200 gr/m²) kullanılarak SSP 180 pres makinesinde 7 atm basınç altında en az 150 dk süresince Cemil Usta ile preslenmiştir.

Örnekler EN 302-1'e göre hazırlanmıştır (Şekil 3.9a ve b). Deney örnekleri 20°C sıcaklık ve %65 bağıl nem koşullarında en az 72 saat bekletildikten sonra SHIMADZU Universal Test Cihazında 3 mm/dk yükleme hızı ile statik çekme kuvveti uygulanarak çekmede maksimum makaslama direnci denklem 12 ile elde edilmiştir (Şekil 3.9d).

$$f_{makas} = \frac{F_{maks}}{l \times b} \quad (12)$$

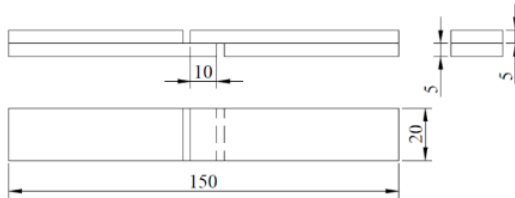
Burada, f_{makas} malzemelerin çekmede makaslama direnci (MPa), F_{maks} kopma anındaki maksimum kuvvet (N), l yapışma yüzey uzunluğu (mm) ve b ise yapışma yüzey genişliğidir (mm).



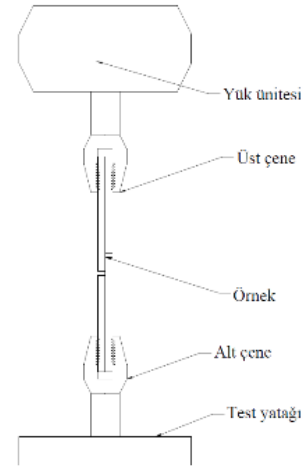
(a)



(b)



(c)



(d)

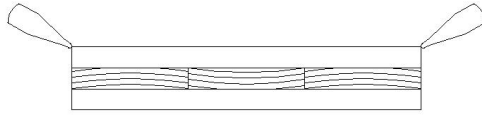
Şekil 3.9: a. Çekmede makaslama örneklerin tutkallanması, b. Örneklerin preslenmesi, c. Örnek boyutu ve d. Deney düzeneği.

3.1.8 ÇLK malzemelerin tahribatsız muayene yöntemleri ile dinamik elastikiyet modülünün belirlenmesi

ÇLK malzemeleri için 4 nokta eğilme deneyinde hazırlanan örnekler eğilme deneyleri öncesinde Şekil 3.10'de verilen deney düzeneğinde Sylvatest Trio cihazı ile dalga hızlarını elde etmek için direkt darbeli ultrasonik teknik kullanılarak ses hızı ölçülmüştür. Dinamik elastikiyet modülü denklem 13 ile belirlenmiştir. Test cihazı 5 farklı noktadan uygulanarak ölçümler alınmıştır (Şekil 2.10).

$$E_{dyn} = \rho \times \left(\frac{L}{t}\right)^2 \times 10^{-6} \quad (13)$$

Burada, E_{dyn} malzemelerin dinamik elastikiyet modülü (MPa), ρ malzemelerin yoğunluğu (kg/m^3) ve t ise dalga hızıdır (μs).



(a)



(b)

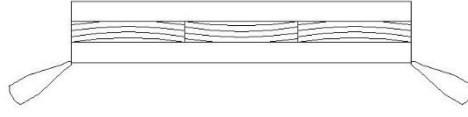


(c)

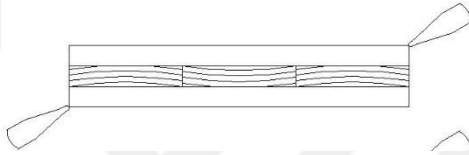


(d)

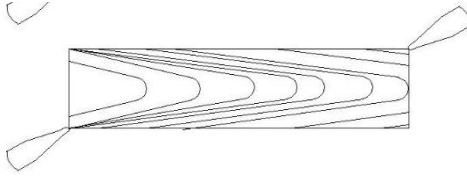
Şekil 3.10: ÇLK örneklerinin tahribatsız muayene ölçümleri a/b. Üst yüzey noktası, c/d. Enine kesit orta noktası.



(e)



(g)



(i)



(f)



(h)



(i)

Şekil 3.11 (devam): ÇLK örneklerinin tahribatsız muayene ölçümleri: e/f. alt yüzey noktası g/h. alt ve üst yüzey noktası diyagonal ve 1/i. yanal diyagonal ölçümler.

3.1.9 ÇLK malzemeninin hafifliğinin belirlenmesi

4 nokta eğme deneyinde kullanılan malzemelerin eğilme dayanımı ve bu numunelerden alınan yoğunluk örnekleri verileri kullanılarak ÇLK malzemelerin hafiflikleri denklem 14 ile belirlenmiştir.

$$\varphi = \frac{ED_{\text{ÇLK}}}{\rho} \quad (14)$$

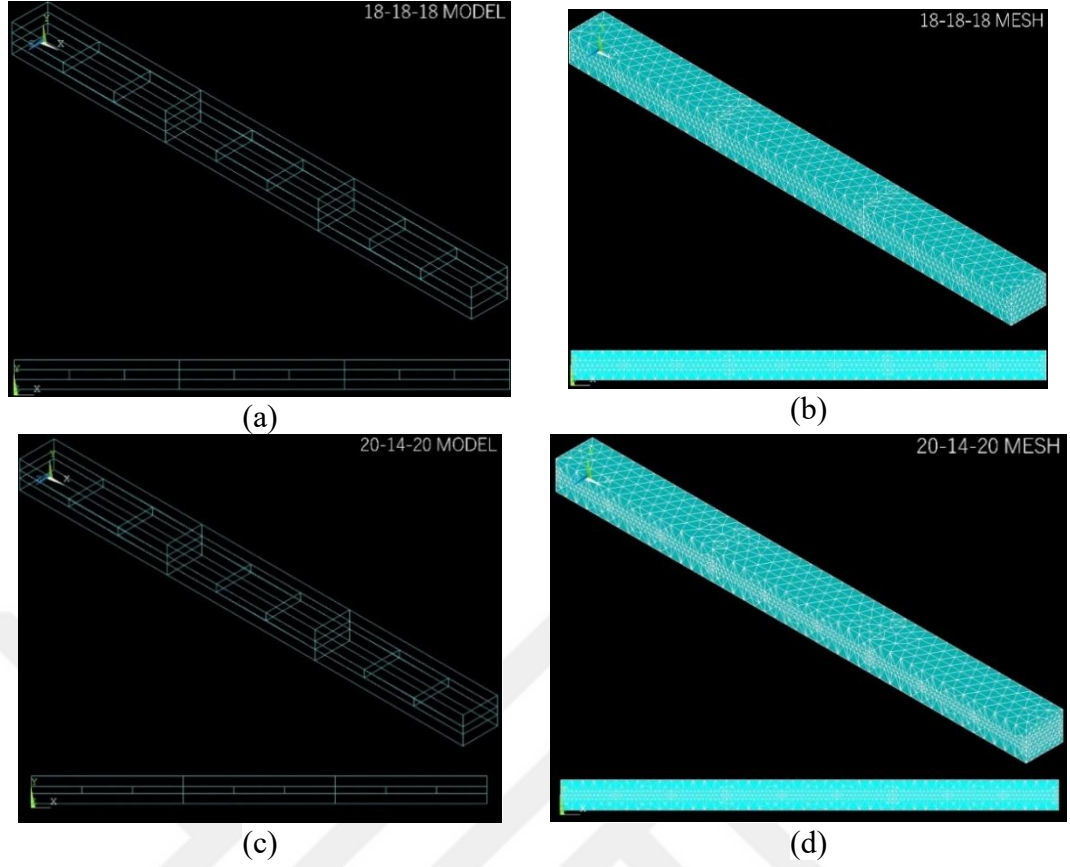
Burada, φ malzemenin hafifliği ($\text{MPa.m}^3/\text{kg}$), ED_{CLK} malzemenin eğilme dayanımı ve ρ ise malzemenin yoğunluğudur (kg/m^3).

3.1.10 ÇLK malzemesinin sonlu elemanlar analizi

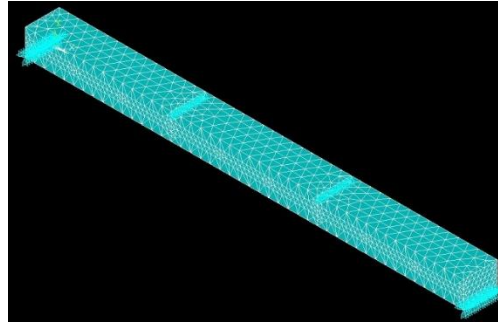
4 nokta eğilme dayanımı için hazırlanan örnekler ANSYS APDL ile sonlu elemanlar modellemesi yapılmıştır. Modellemede “Solid/20 node 186” elemnt tipi kullanılmıştır. Malzemelerin ortotropi özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Katmalar arası yapışma VGLUE ile tanımlanmıştır. ÇLK malzemeler için modelleme ve mesh atame Şekil 3.11’de verilmiştir. Ayrıca, sınır koşulları 4 nokta eğme deneyi ile konfigürasyonu ile benzer destek noktaları tüm yönlerde kısıtlanmış ($\text{ALLDOF} = 0$) ve yükleme noktalarında ise 20 mm deformasyon ($\text{UY} = -20$) tanımlanmıştır (Şekil 3.12).

Çizelge 3.2: Malzemelerin elastik sabiti (MPa).

Odun Türü	EL	ER	ET	μ_{LT}	μ_{RT}	μ_{LR}	μ_{TL}	μ_{RL}	μ_{TR}	GLT	GRT	GLR	Kaynak
Gökmar	11172	481	348	0,81	0,61	0,54	0,07	0,171	0,60	576	40	1077	Forest Products Laboratory, 2010
Ladin	11200	873	481	0,467	0,435	0,372	0,025	0,04	0,245	683	33,6	716	Aydın ve Özveren, 2018
Kavak	5937	494	600	0,139	0,276	1,773	0,013	0,127	0,436	694	129	583	Aydın and Aydın, 2024



Şekil 3.12: ANSYS APDL a. 18-18-18 mm katmanlar için modelleme, b. 18-18-18 mm katmanlar için mesh atama, c. 20-14-20 mm katmanlar için modelleme ve d. 20-14-20 katmanlar için mesh atama.



Şekil 3.13: ANSYS APDL'de sınır koşulları.

3.1.11 Verilerin istatistiksel analizi

Yapılan çalışmada deneyler sonucunda elde edilen verilerin grup içi ve gruplar arası varyasyonları istatistiksel olarak tespit edilecek ve gruplar arasında anlamlı farklılık olup olmadığı SPSS veri analiz yazılımından yararlanılarak belirlenmiştir. ÇLK örneklerinin bazı mekanik ve fiziksel özellikleri için iki yönlü varyans analizi (odun türü ve katman kalınlığı) yapılırken, masif malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri ile bindirme kayma dayanımı belirlenmesinde ise (odun türü) tek yönlü varyans analizi yapılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Yoğunluk ve Rutubet

Çalışmada incelenen üç farklı odun türüne ait yoğunluk ve rutubet miktarları Çizelge 4.1.'de özetlenmiştir. Gökmar türü, ortalama 386,33 kg/m³ yoğunluk ve %9,94 rutubet değerine sahip olup, yoğunluk için %6,63 ve rutubet için %1,64 varyasyon katsayısı ile oldukça homojen bir yapı sergilemiştir. Ladin türü, 445,95 g/cm³ ile en yüksek ortalama yoğunluk değerine sahip olmasına karşın, %14,67'lik yoğunluk varyasyon katsayısı ile örnekler arasında belirgin bir değişkenlik göstermektedir; rutubet değeri ise ortalama %9,88 olup, %2,45 varyasyon katsayısıyla diğer türlere kıyasla daha değişken bir nem içeriği sunmaktadır. En düşük yoğunluk ve nem değerlerine sahip olan Kavak türü, sırasıyla 349,71 g/cm³ ve %8,84 ortalamalarıyla dikkat çekmekte; yoğunluk ve rutubet için sırasıyla %4,70 ve %1,71 varyasyon katsayılarıyla yüksek düzeyde homojenlik göstermektedir. Bu sonuçlar, odun türlerinin hem fiziksel hem de higroskopik özellikler bakımından önemli farklılıklar taşıdığını ortaya koymakta ve bu farklılıkların potansiyel kullanım alanları açısından dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 4.1: Masif Malzemelerin yoğunluk ve rutubet miktarları.

Odun Türü	Yoğunluk (kg/m ³)			Rutubet Miktarı (%)		
	Ortalama	SS	VK	Ortalama	SS	VK
Gökmar	386,33	25,62	6,63%	9,94	0,16	1,64%
Ladin	445,95	65,40	14,67%	9,88	0,24	2,45%
Kavak	349,71	16,42	4,70%	8,84	0,15	1,71%

Çizelge 4.2'ye göre masif malzemelerin yoğunluğu için odun türü (p-değeri ≤ 0,05) istatistiksel olarak önemlidir.

Çizelge 4.2: Masif malzemelerin yoğunluğu için tek-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Gruplar arası	11558,84	2	5779,42	7,47	,008
Gruplar içi	9280,86	12	773,40		
Toplam	20839,70	14			

Çizelge 4.3'te masif malzemelerin yoğunluğu için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Farklı harf değerine sahip olan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Çizelge 4.3: Masif malzemelerin yoğunluğu için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.

Odun Türü	N	Gruplama
Kavak	5	A
Gök nar	5	A
Ladin	5	B

Farklı katman düzenlerine ve katman kalınlıklarına sahip örnek gruplarının yoğunluk ve rutubet miktarı değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Çizelge 4.4). Homojen örnek gruplarında (G-G-G, L-L-L ve K-K-K), 18-18-18 mm'lik eşit katman kalınlığına sahip numuneler, genel olarak 20-14-20 mm'lik düzensiz katman dağılımına sahip numunelere kıyasla daha yüksek yoğunluk ve daha düşük varyasyon katsayısı (VK) göstermiştir. Örneğin, G-G-G grubunda yoğunluk ortalaması 429,92 kg/m³ olup %2,18 VK ile oldukça homojen bir dağılım sergilerken, 20-14-20 düzeninde bu değer 423,43 kg/m³ ve %1,14 VK olarak belirlenmiştir. L-L-L grubunda ise benzer şekilde 18-18-18 düzeni daha yüksek yoğunluk (451,47 kg/m³) ve düşük VK (%1,82) sunarken, 20-14-20 düzeninde yoğunluk ortalaması 385,79 kg/m³'e düşmüş ve VK %3,36'ya yükselmiştir. K-K-K grubunda ise her iki katman kalınlığı için de yoğunluk ve rutubet değerlerinin nispeten daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Hibrit örnek gruplarında (G-K-G, L-K-L, G-K-L ve L-K-G), 18-18-18 mm kalınlığında düzenlenen numuneler çoğunlukla daha yüksek ortalama yoğunluk değerlerine ulaşmıştır. Örneğin, L-K-L grubunda yoğunluk 443,22 kg/m³ ve VK %3,06 iken, 20-14-20 düzeninde bu değer 397,86 kg/m³ ve VK %5,20 olarak ölçülmüştür. En yüksek rutubet varyasyonu ise G-K-L grubunun 18-18-18 düzeninde %11,57 ile kaydedilmiş, bu durum örnekler arasındaki nem homojenliğinin düşük olduğunu göstermiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, homojen örnek grupları hibrit gruplara kıyasla daha stabil yoğunluk ve nem özellikleri sergilemekte, ayrıca eşit

katman kalınlığına sahip konfigürasyonlar daha düşük varyasyon katsayıları ile daha homojen yapısal özellikler ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.4: ÇLK malzemelerin yoğunluk ve rutubet miktarı.

Örnek Grubu	Katman Kalınlığı	Yoğunluk (kg/m ³)			Rutubet miktarı (%)		
		Ortalama	SS	VK	Ortalama	SS	VK
G-G-G	18-18-18	429,92	9,38	2,18%	10,72	0,08	0,72%
	20-14-20	423,43	4,84	1,14%	10,36	0,32	3,06%
L-L-L	18-18-18	451,47	8,23	1,82%	10,16	0,26	2,55%
	20-14-20	385,79	12,96	3,36%	10,39	0,29	2,81%
K-K-K	18-18-18	378,95	9,20	2,43%	9,86	0,28	2,87%
	20-14-20	351,48	13,83	3,94%	9,61	0,29	2,99%
G-K-G	18-18-18	398,93	13,03	3,27%	10,00	0,29	2,89%
	20-14-20	401,43	19,48	4,85%	10,06	0,22	2,19%
L-K-L	18-18-18	443,22	13,55	3,06%	10,72	0,30	2,84%
	20-14-20	397,86	20,70	5,20%	9,79	0,22	2,29%
G-K-L	18-18-18	442,79	23,36	5,28%	10,25	1,19	11,57%
	20-14-20	395,78	17,68	4,47%	10,12	0,19	1,87%
L-K-G	18-18-18	411,41	11,15	2,71%	10,03	0,23	2,34%
	20-14-20	396,91	11,37	2,87%	10,18	0,21	2,08%

Çizelge 4.5'e göre ÇLK malzemelerin yoğunluğunda odun türü (p-değeri $\leq 0,05$), katman kalınlığı (p-değeri $\leq 0,05$) ve odun türü ile katman kalınlığı arasındaki etkileşim (p-değeri $\leq 0,05$) istatistiksel olarak önemlidir. Odun türü ve katman kalınlığı ÇLK malzemelerin yoğunluğundaki değişimin %81,3'ünü kapsamaktadır.

Çizelge 4.5: ÇLK malzemelerin yoğunluğu için iki-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Odun Türü	26525,68	6	4420,95	21,37	$\leq 0,001$
Katman Kalınlığı	14864,97	1	14864,97	71,84	$\leq 0,001$
Odun Türü * Katman Kalınlığı	9121,05	6	1520,18	7,35	$\leq 0,001$
R ² = 0,813					

Çizelge 4.6'da ÇLK malzemelerin yoğunluğu için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Aynı harf değerine sahip olmayan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Çizelge 4.6: ÇLK malzemelerin yoğunluğu için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.

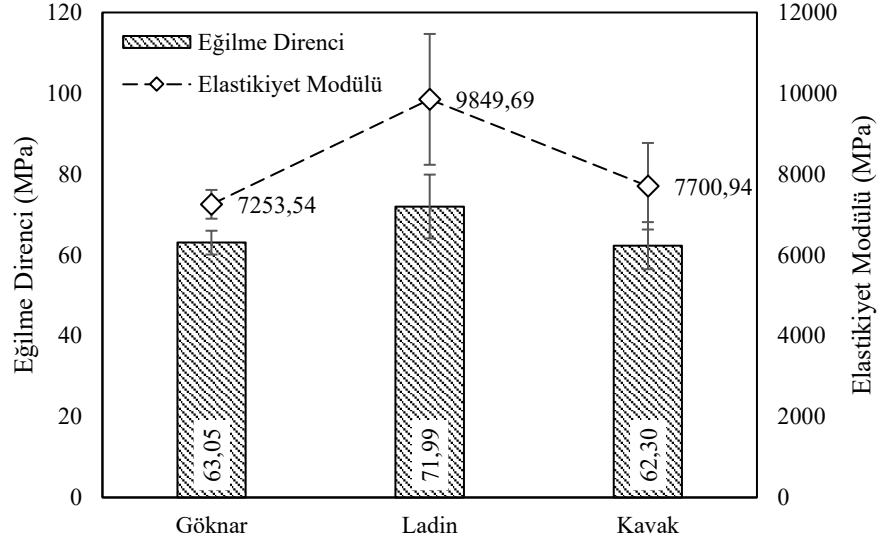
Örnek	N	Gruplama						
KKK20	5	A						
KKK18	5	A	B					
LLL20	5		B	C				
GKL20	5		B	C	D			
LKG20	5		B	C	D			
LKL20	5		B	C	D			
GKG18	5		B	C	D	E		
GKG20	5		B	C	D	E		
LKG18	5			C	D	E	F	
GGG20	5				D	E	F	G
GGG18	5					E	F	G
GKL18	5						F	G
LKL18	5						F	G
LLL18	5							G

4.2 Eğilme Özellikleri

Şekil 4.1’de farklı odun türlerine ait ortalama eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri birlikte verilmiştir. Eğilme direnci açısından değerlendirildiğinde, en yüksek ortalama değer 71,99 MPa ile Ladin odununda elde edilmiştir. Ladin’i sırasıyla 63,05 MPa ile Gökmar ve 62,30 MPa ile Kavak takip etmiştir. Bu sonuçlar, Ladin odununun eğilme performansı bakımından diğer iki türden daha üstün mekanik özellikler sergilediğini göstermektedir.

Elastikiyet modülü bakımından da benzer bir eğilim gözlenmiş olup, Ladin odunu 9849,69 MPa ile en yüksek değere sahiptir. Kavak ve Gökmar türleri ise sırasıyla 7700,94 MPa ve 7253,54 MPa elastikiyet modülü göstermiştir. Elde edilen bu bulgular, Ladin odununun hem mukavemet hem de rijitlik açısından daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Her iki mekanik özellikte de Ladin odununun diğer türlere kıyasla daha yüksek değerlere sahip olması, onun yapısal uygulamalarda daha tercih edilebilir bir tür olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, Kavak ve Gökmar türlerinin de benzer eğilme dirençleri sunduğu, ancak elastik davranışlarının daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, özellikle yük altında deformasyon miktarının önemli olduğu tasarımlarda, elastikiyet modülünün belirleyici bir kriter olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.1: Masif malzemelerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü.

Çizelge 4.7'ye göre masif malzemelerin eğilme direncinde odun türü (p -değeri $\leq 0,05$) istatistiksel olarak önemlidir.

Çizelge 4.7: Masif malzemelerin eğilme direnci için tek-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Gruplararası	290,45	2	145,22	4,15	,043
Gruplariçi	420,14	12	35,01		
Toplam	710,59	14			

Çizelge 4.8'de masif malzemelerin eğilme direnci için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Aynı harf değerine sahip olan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklı değildir.

Çizelge 4.8: Masif malzemelerin eğilme direnci için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.

Odun Türü	N	Gruplama
Kavak	5	A
Gök nar	5	A
Ladin	5	A

Çizelge 4.9'a göre masif malzemelerin elastikiyet modülünde odun türü (p -değeri $\leq 0,05$) istatistiksel olarak önemlidir.

Çizelge 4.9: Masif malzemelerin elastikiyet modülü için tek-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Gruplar arası	19262086,04	2	9631043,02	7,42	,008
Gruplar içi	15573572,34	12	1297797,70		
Toplam	34835658,38	14			

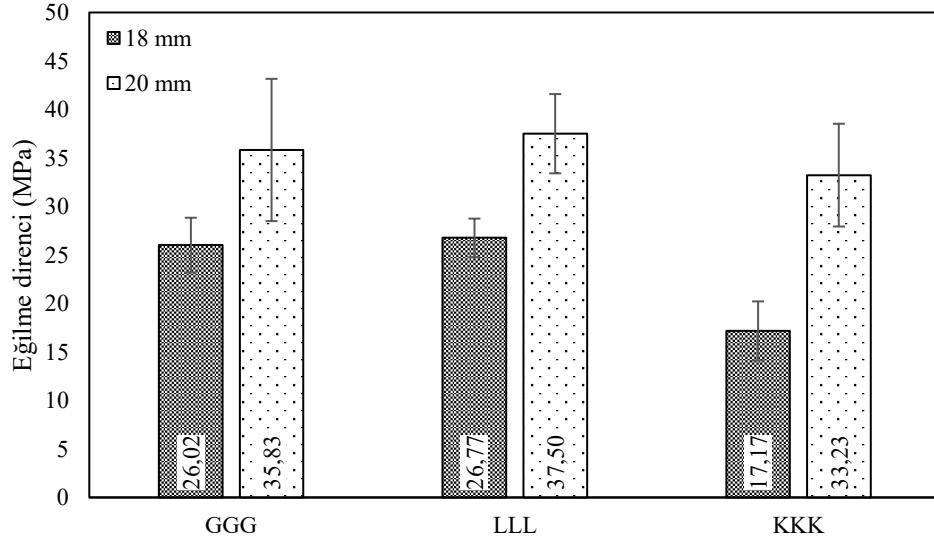
Çizelge 4.10’da masif malzemelerin elastikiyet modülü için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Farklı harf değerine sahip olan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Çizelge 4.10: Masif malzemelerin elastikiyet modülü için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.

Odun Türü	N	Gruplama
Gök nar	5	A
Kavak	5	A
Ladin	5	B

Şekil 4.2’de, farklı odun türlerinden (GGG, LLL, KKK) üretilen ÇLK numunelerinin iki farklı dış katman kalınlığına (18 mm ve 20 mm) göre ortalama eğilme direnci değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Genel olarak, tüm odun türlerinde 20 mm katman kalınlığına sahip numunelerin 18 mm kalınlıktaki numunelere kıyasla daha yüksek eğilme direnci gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, artan katman kalınlığının yapısal rijitlik üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir.

Özellikle LLL grubu 20 mm kalınlığında 35,50 MPa ortalama eğilme direnci ile en yüksek değeri sunarken, 18 mm kalınlığındaki eşdeğeri 26,71 MPa olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde GGG grubunda 18 mm ve 20 mm kalınlıktaki numunelerin eğilme dirençleri sırasıyla 26,07 MPa ve 35,83 MPa; KKK grubunda ise 17,71 MPa ve 32,53 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, katman kalınlığının yalnızca mukavemet değil aynı zamanda yapısal bütünlük üzerinde de belirleyici olduğunu göstermektedir.



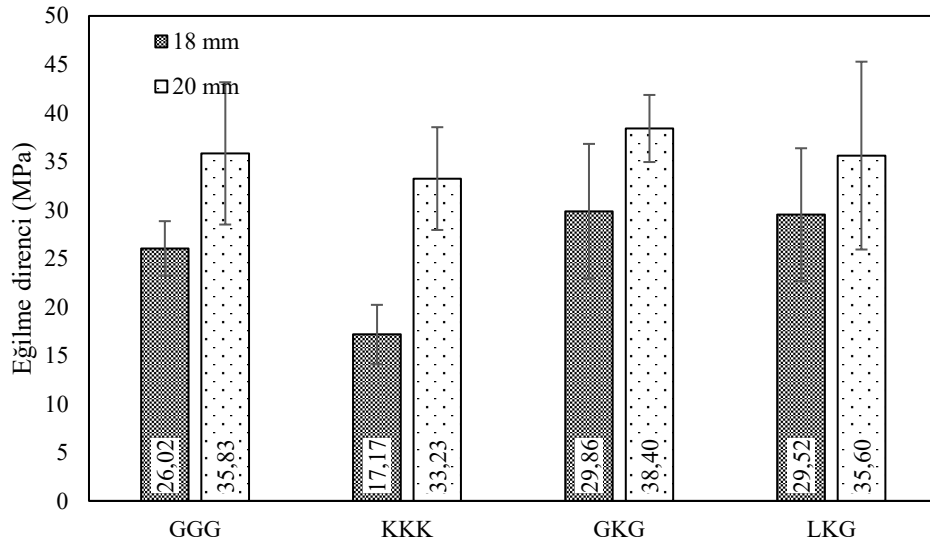
Şekil 4.2: ÇLK malzemelerin eğilme direnci.

Şekil 4.3'te, Gökna ve Kavak odun türlerinin hem kontrol (GGG, KKK) hem de hibrit (GKG, LKG) ÇLK (Çapr konfigürasyonlarına ait eğilme direnci değerleri, 18 mm ve 20 mm katman kalınlıkları dikkate alınarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur. Genel olarak, tüm gruplarda 20 mm katman kalınlığına sahip numuneler 18 mm kalınlıkta olanlara kıyasla daha yüksek eğilme direnci göstermiştir. Bu eğilim, dış katman kalınlığının eğilme performansını doğrudan etkileyen yapısal bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Gökna odunu bazlı kontrol grubu (GGG) ile hibrit grubu (GKG) karşılaştırıldığında, 18 mm kalınlıktaki numunelerde eğilme dirençleri sırasıyla 26,07 MPa ve 30,66 MPa olarak ölçülmüş; benzer şekilde 20 mm kalınlıkta bu değerler 35,83 MPa (GGG) ve 38,40 MPa (GKG) olmuştur. GKG grubunun her iki kalınlıkta da GGG grubuna kıyasla daha yüksek eğilme direnci göstermesi, kavak ara katman kullanımı ile elde edilen hibrit yapının gökna esaslı kontrol yapısına göre daha iyi bir yük taşıma kapasitesine sahip olabileceğini göstermektedir. Bu durum, hibrit yapının katmanlar arası gerilme dağılımını daha dengeli bir şekilde sağlayabildiğine işaret etmektedir.

Kavak esaslı kontrol grubu (KKK) ile ladin-kavak-gökna bileşenlerinden oluşan hibrit LKG grubu arasında da benzer bir karşılaştırma yapılmıştır. 18 mm kalınlığında KKK grubunun eğilme direnci 17,71 MPa olarak ölçülürken, LKG grubunda bu değer 20,52 MPa'ya yükselmiştir. Aynı şekilde, 20 mm kalınlıkta KKK grubunda 32,53 MPa eğilme direncine karşılık, LKG grubunda 35,60 MPa'lık bir değer elde edilmiştir. Bu artış, hibrit yapıların kavak esaslı kontrol numunelerine kıyasla eğilme dayanımı

açısından avantaj sağladığını ve farklı odun türlerinin kombinasyonunun mekanik performansı iyileştirebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.3: Hibrit ÇLK malzemelerin eğilme direncinin göknar ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

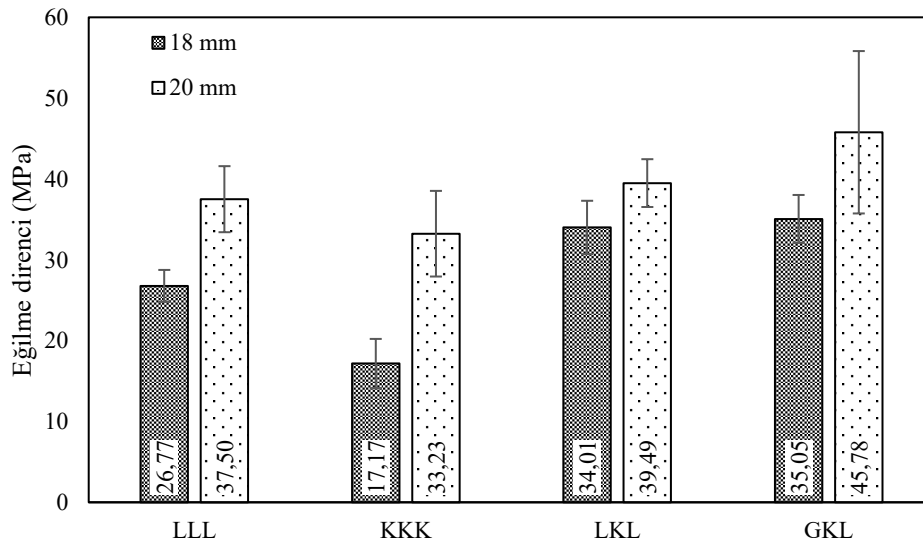
Şekil 4.4'te, ladin ve kavak odun türlerinin hem kontrol (LLL, KKK) hem de hibrit (LKL, GKL) ÇLK gruplarına ait eğilme direnci (MPa) değerleri, iki farklı katman kalınlığı (18 mm ve 20 mm) dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tüm gruplarda ortak olarak gözlemlenen eğilim, 20 mm katman kalınlığına sahip numunelerin, 18 mm kalınlıktaki numunelere kıyasla daha yüksek eğilme direnci sergilemesidir. Bu durum, kalın dış katman kullanımının yapıdaki taşıma kapasitesini artırdığını ve mekanik performansa olumlu katkı sağladığını göstermektedir.

Ladin esaslı kontrol grubu (LLL) ile ladin-kavak-ladin kompozitinden oluşan hibrit grup (LKL) karşılaştırıldığında, 18 mm katman kalınlığında LLL grubunda eğilme direnci 26,71 MPa iken, LKL grubunda bu değer 30,11 MPa olarak ölçülmüştür. 20 mm katman kalınlığında ise sırasıyla 35,50 MPa (LLL) ve 39,49 MPa (LKL) değerlerine ulaşılmıştır. LKL grubunun her iki durumda da kontrol grubundan daha yüksek eğilme direnci göstermesi, kavak ara katmanının ladin dış katmanlarla başarılı şekilde bütünleştiğini ve bu kombinasyonun taşıyıcı kapasiteyi artırdığını göstermektedir.

Kavak esaslı kontrol grubu (KKK) ile göknar-kavak-ladin bileşiminden oluşan GKL hibrit grubu arasında da benzer bir değerlendirme yapılmıştır. KKK grubunda eğilme direnci 18 mm kalınlıkta 17,71 MPa, 20 mm kalınlıkta 33,23 MPa olarak ölçülmüştür.

Buna karşılık, GKL grubunda eğilme direnci 18 mm’de 31,05 MPa, 20 mm’de ise 41,78 MPa’ya kadar yükselmiştir. Bu bulgular, çok bileşenli hibrit yapıların, homojen kavak odunu esaslı yapıdan daha üstün eğilme performansı sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle GKL grubunun 20 mm kalınlığında ulaştığı eğilme direnci, tüm gruplar arasında en yüksek değer olarak öne çıkmaktadır.

Elde edilen veriler, farklı türde odunların optimal şekilde bir araya getirilmesiyle üretilen hibrit ÇLK yapıların, kontrol gruplarına kıyasla eğilme dayanımı açısından daha üstün performans sergileyebileceğini göstermektedir. Bu durum, özellikle taşıyıcı sistem tasarımlarında hem ekonomik hem de mekanik açıdan daha verimli çözümler geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Hata çubukları incelendiğinde, tüm gruplarda belirli düzeyde varyasyon bulunmakla birlikte, hibrit grupların daha kararlı ve dengeli yapılar sunduğu söylenebilir. Bu da katmanlar arası uyumun, mekanik performansın sürekliliği açısından önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.4: Hibrit ÇLK malzemelerin eğilme direncinin ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

Çizelge 4.11’e göre ÇLK malzemelerin eğilme direnci özelliğinde odun türü (p -değeri $\leq 0,05$) ve katman kalınlığı (p -değeri $\leq 0,05$) istatistiksel olarak önemli iken katmanlarda kullanılan odun türü ve katman kalınlığı etkileşiminin (p -değeri $> 0,05$) ise istatistiksel olarak gruplar arasında bir farklılık ortaya koyduğu gösteren yeterli kanıt yoktur. Odun türü ve katman kalınlığı ÇLK malzemelerin eğilme direncindeki değişimin %63,8’ini kapsamaktadır.

Çizelge 4.11: ÇLK malzemelerin eğilme direnci için iki-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Odun Türü	1362,34	6	227,06	7,07	≤0,001
Katman Kalınlığı	1623,84	1	1623,84	50,55	≤0,001
Odun Türü * Katman Kalınlığı	186,99	6	31,16	0,97	0,454
$R^2 = 0,638$					

Çizelge 4.12’de ÇLK malzemelerin eğilme direnci için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Aynı harf değerine sahip olmayan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Çizelge 4.12: ÇLK malzemelerin eğilme direnci için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.

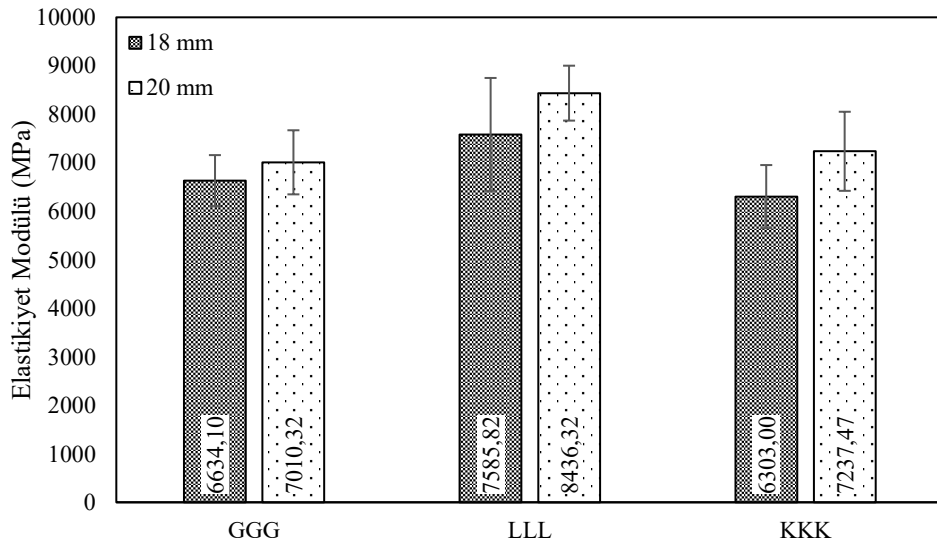
Örnek	N	Gruplama			
KKK18	5	A			
GGG18	5	A	B		
LLL18	5	A	B		
LKG18	5	A	B	C	
GKG18	5		B	C	
KKK20	5		B	C	D
LKL18	5		B	C	D
GKL18	5		B	C	D
LKG20	5		B	C	D
GGG20	5		B	C	D
LLL20	5		B	C	D
GKG20	5		B	C	D
LKL20	5			C	D
GKL20	5				D

Şekil 4.5’te, farklı odun türlerinden (GGG, LLL, KKK) üretilen ÇLK örneklerinin elastikiyet modülü (MPa) değerleri, iki farklı dış katman kalınlığı (18 mm ve 20 mm) dikkate alınarak sunulmuştur. Genel eğilim, tüm gruplarda 20 mm kalınlıktaki numunelerin, 18 mm kalınlıkta olanlara kıyasla daha yüksek elastikiyet modülü göstermesi yönündedir. Bu bulgu, artan katman kalınlığının sadece eğilme dayanımı üzerinde değil, aynı zamanda elastik davranış üzerinde de olumlu etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

GGG grubunda, 18 mm kalınlığındaki numunelerin ortalama elastikiyet modülü 6634,10 MPa, 20 mm kalınlığındakilerin ise 7001,92 MPa olarak belirlenmiştir. LLL

grubunda bu değerler sırasıyla 7855,82 MPa (18 mm) ve 8565,22 MPa (20 mm) olup, her iki kalınlıkta da en yüksek elastikiyet modülü değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, ladin esaslı ÇLK'lerin rijitlik açısından diğer türlere kıyasla daha avantajlı olduğunu göstermektedir. KKK grubunda ise 18 mm kalınlıkta 6030,00 MPa, 20 mm kalınlıkta ise 7275,47 MPa değerleri elde edilmiştir. Kavak odunundan elde edilen numunelerin elastikiyet modülü açısından diğer türlerin gerisinde kaldığı görülmektedir.

Bu bulgular, odun türünün elastik davranış üzerinde önemli bir belirleyici olduğunu ve katman kalınlığına bağlı olarak bu performansın daha da optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ladin odunundan üretilen ÇLK'ler, hem yüksek elastikiyet modülü hem de düşük varyasyon eğilimleri ile taşıyıcı sistemlerde rijitlik gerektiren uygulamalarda tercih edilebilirliğini artırmaktadır. Gökmar ve kavak türleri ise daha düşük elastik modül değerlerine sahip olmakla birlikte, uygun katman konfigürasyonları ve hibrit yapılarla bu performans artırılabilir.

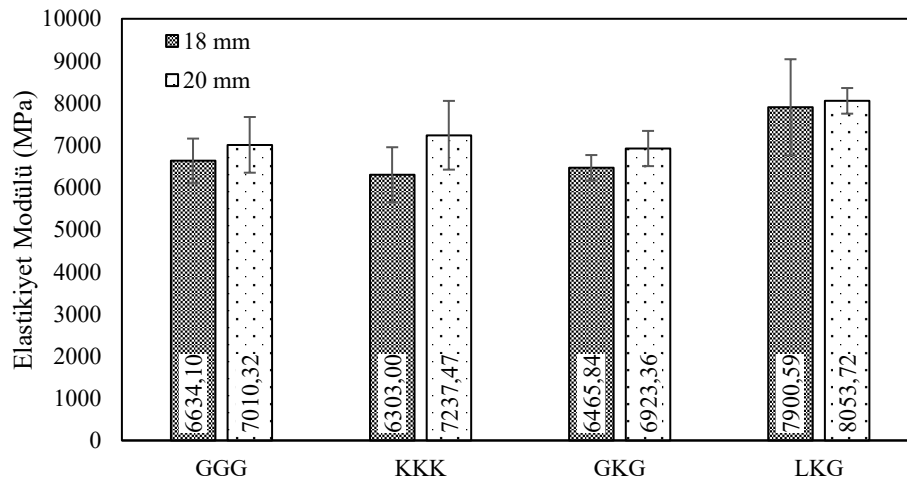


Şekil 4.5: ÇLK malzemelerin elastikiyet modülü.

Şekil 4.6'da gökmar ve kavak odun türlerinden üretilmiş hem kontrol (GGG, KKK) hem de hibrit (GKG, LKG) ÇLK malzemelere ait elastikiyet modülü değerleri, iki farklı dış katman kalınlığı (18 mm ve 20 mm) dikkate alınarak sunulmuştur. Genel eğilim, tüm gruplarda 20 mm kalınlığındaki örneklerin, 18 mm kalınlıktakilere kıyasla daha yüksek elastikiyet modülüne sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, artan dış katman kalınlığının yapısal rijitliği olumlu yönde etkilediğini ve elastik deformasyon direncini artırdığını göstermektedir.

Göknar odununa dayalı gruplar incelendiğinde, kontrol grubunu temsil eden GGG numunelerinde elastikiyet modülü 18 mm katman kalınlığında 6634,10 MPa, 20 mm’de ise 7001,32 MPa olarak ölçülmüştür. GKG hibrit grubunda ise bu değerler sırasıyla 6150,06 MPa (18 mm) ve 6923,56 MPa (20 mm) şeklinde gerçekleşmiştir. GGG grubunun, hibrit GKG’ye göre daha yüksek elastikiyet modülü göstermesi, homojen göknar odununun rijitlik açısından daha avantajlı olduğunu, kavak ara katmanın bu özelliği hafifçe zayıflatabileceğini göstermektedir. Ancak bu fark, hibrit yapıların görece düşük elastikiyet değerlerine rağmen daha esnek ve enerji sönümleyici bir yapı sağlayabileceğine de işaret etmektedir.

Kavak odunu esaslı gruplar arasında yapılan karşılaştırmada, kontrol grubu KKK numunelerinde elastikiyet modülü 18 mm kalınlığında 6030,00 MPa, 20 mm’de ise 7275,47 MPa olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, LKG hibrit grubunda bu değerler sırasıyla 7002,56 MPa (18 mm) ve 8035,72 MPa (20 mm) olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, kavak esaslı hibrit yapıların elastikiyet açısından önemli ölçüde daha üstün performans gösterdiğini ve farklı odun türlerinin (ladın, göknar) kavakla birlikte kullanıldığında rijitlik kapasitesini artırdığını ortaya koymaktadır. Özellikle 20 mm kalınlığındaki LKG numunesi, tüm gruplar arasında en yüksek elastikiyet modülüne ulaşarak hibrit yapıların mühendislik açısından potansiyel avantajlarını vurgulamaktadır.



Şekil 4.6: Hibrit ÇLK malzemelerin elastikiyet modülünün göknar ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

Sonuç olarak, göknar odununda kontrol grubu daha rijit davranış sergilerken, kavak odununda hibrit yapıların elastikiyet modülü değerlerinde önemli bir artış sağladığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, uygun tür kombinasyonları ve katman tasarımlarıyla

geliştirilen hibrit ÇLK malzemelerin yapısal performansı artırabileceği ve kullanım alanlarının genişletilebileceği anlaşılmaktadır.

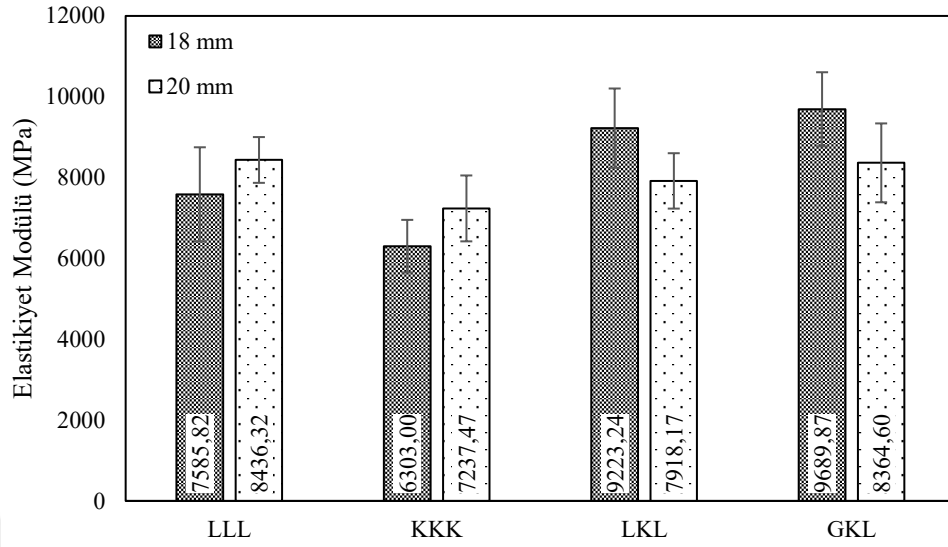
Şekil 4.7’de, ladin ve kavak odun türlerinden üretilmiş kontrol (LLL, KKK) ve hibrit (LKL, GKL) ÇLK malzemelerine ait elastikiyet modülü (MPa) değerleri, 18 mm ve 20 mm katman kalınlıkları dikkate alınarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur. Genel eğilim olarak, tüm örnek gruplarında 20 mm kalınlığındaki numunelerin 18 mm kalınlıkta olanlara kıyasla daha yüksek elastikiyet modülü değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, artan dış katman kalınlığının yapı rijitliği üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve esneklik sınırındaki deformasyon direncini artırdığını göstermektedir.

Ladin esaslı gruplar incelendiğinde, kontrol grubu LLL numunelerinde elastikiyet modülü 18 mm katman kalınlığında 7355,62 MPa, 20 mm kalınlığında ise 8496,52 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre, ladin odununun homojen yapısı, yüksek elastikiyet modülü ile yapısal rijitliğe katkı sağlamaktadır. Hibrit yapıya sahip LKL grubunda ise elastikiyet modülü 18 mm kalınlığında 7991,87 MPa, 20 mm kalınlığında 9503,17 MPa olarak kaydedilmiştir. LKL grubunun her iki kalınlık düzeyinde de LLL grubundan daha yüksek elastikiyet değerlerine ulaşması, hibrit yapıdaki kavak ara katmanın, ladin dış katmanlarla etkili şekilde bütünleşerek malzemenin mekanik performansını artırdığını ortaya koymaktadır.

Kavak odununa dayalı gruplarda ise benzer bir değerlendirme yapılmıştır. KKK kontrol grubunda elastikiyet modülü 18 mm kalınlığında 6030,01 MPa, 20 mm kalınlığında 7271,47 MPa olarak ölçülürken, GKL hibrit grubunda bu değerler sırasıyla 8541,60 MPa ve 9868,60 MPa olarak belirlenmiştir. Özellikle GKL grubunun elde ettiği yüksek elastikiyet modülü değerleri, kavak odununa dayalı kontrol yapısının mekanik sınırlarının hibrit tasarımlarla önemli ölçüde aşılabildiğini göstermektedir. Bu bulgular, kavak gibi düşük yoğunluklu türlerin, uygun tür kombinasyonlarıyla birlikte kullanıldığında yüksek rijitlik gerektiren yapısal uygulamalara entegre edilebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak hem ladin hem de kavak odunu kullanılarak üretilen hibrit ÇLK malzemeler, kontrol gruplarına kıyasla daha yüksek elastikiyet modülü değerleri sergilemiştir. Bu bulgu, farklı odun türlerinin doğru kombinasyonlarla bir araya getirilmesiyle hem yapısal rijitliği artıran hem de kaynak kullanımında verimlilik

sağlayan yüksek performanslı ahşap yapı elemanlarının elde edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.7: ÇLK malzemelerin elastikiyet modülünün ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

Çizelge 4.13'e göre ÇLK malzemelerin elastikiyet modülü özelliğinde odun türü (p -değeri $\leq 0,05$) ve odun türü ile katman kalınlığı arasındaki etkileşim (p -değeri $\leq 0,05$) istatistiksel olarak önemli iken katman kalınlığının (p -değeri $> 0,05$) tek başına istatistiksel olarak gruplar arasında bir farklılık ortaya koyduğu gösteren yeterli kanıt yoktur. Odun türü ve katman kalınlığı ÇLK malzemelerin eğilme direncindeki değişimin %66,7'ini kapsamaktadır.

Çizelge 4.13: ÇLK malzemelerin elastikiyet modülü için iki-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
OdunTürü	53389629,68	6	8898271,61	14,90	$\leq 0,001$
Katman Kalınlığı	7151,22	1	7151,22	0,01	0,914
OdunTürü * Katman Kalınlığı	13568866,41	6	2261477,73	3,79	0,003
$R^2 = 0,667$					

Çizelge 4.14'te ÇLK malzemelerin elastikiyet modülü için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Aynı harf değerine sahip olmayan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Çizelge 4.14: ÇLK malzemelerin elastikiyet modülü için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.

Örnek	N	Gruplama				
KKK18	5	A				
GKG18	5	A	B			
GGG18	5	A	B			
GKG20	5	A	B	C		
GGG20	5	A	B	C		
KKK20	5	A	B	C		
LLL18	5	A	B	C	D	
LKG18	5	A	B	C	D	
LKL20	5	A	B	C	D	
GKL20	5		B	C	D	E
LKG20	5			C	D	E
LLL20	5			C	D	E
LKL18	5				D	E
GKL18	5					E

4.3 Kayma Modülü

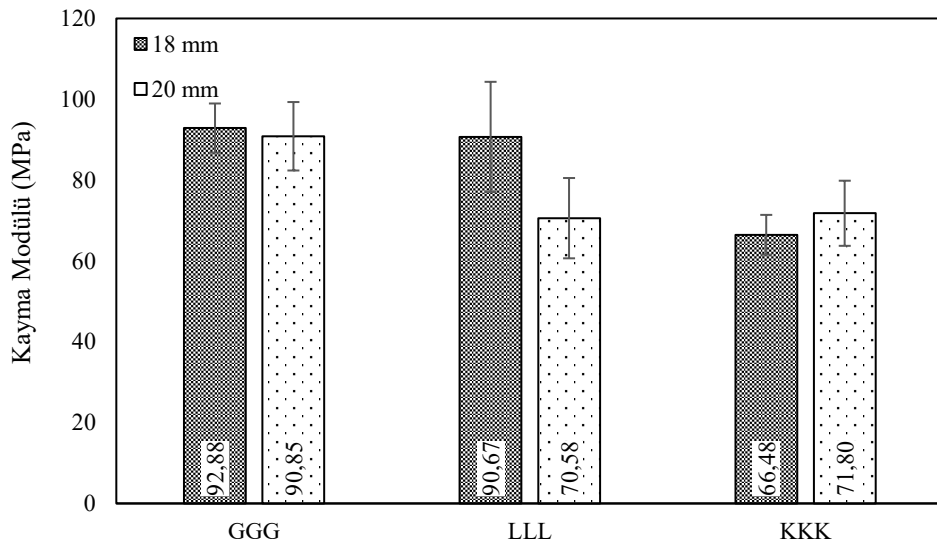
Şekil 4.8’de, farklı odun türlerinden (GGG, LLL ve KKK) elde edilen ÇLK malzemelerinin kayma modülü (MPa) değerleri, 18 mm ve 20 mm dış katman kalınlıkları dikkate alınarak sunulmuştur. Tüm gruplarda 18 mm kalınlıktaki örneklerin, 20 mm kalınlıktakilere kıyasla daha yüksek kayma modülü değerleri gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, daha ince katmanların katmanlar arası kayma davranışına karşı daha rijit davrandığını ve deformasyon kapasitesinin daha düşük olduğunu göstermektedir.

Gökmar esaslı GGG grubunda, 18 mm katman kalınlığında ortalama kayma modülü 92,48 MPa iken, 20 mm kalınlığındaki örneklerde bu değer 90,58 MPa olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, ladin esaslı LLL grubunda 18 mm kalınlıkta 90,61 MPa, 20 mm’de ise 78,95 MPa değerlerine ulaşılmıştır. Kavak esaslı KKK grubunda ise kayma modülü değerleri sırasıyla 71,45 MPa (18 mm) ve 71,80 MPa (20 mm) olarak belirlenmiştir. Bu değerler, kavak odununun diğer türlere kıyasla daha düşük kayma rijitliğine sahip olduğunu göstermekte ve bu durum kavak odununun daha düşük yoğunluk ve mekanik dayanım özellikleri ile uyumludur.

Kayma modülü açısından değerlendirildiğinde, gökmar ve ladin türlerinin kavak odununa göre daha yüksek değerler sunduğu ve bu sayede kesme gerilmeleri altında daha rijit bir davranış sergilediği görülmektedir. Ancak 20 mm kalınlığındaki

örneklerde kayma modülünün düşüş göstermesi, artan kalınlığın katmanlar arası deformasyonu artırabileceğini ve bu nedenle özellikle kayma etkilerinin kritik olduğu uygulamalarda kalınlık seçiminin dikkatle yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, elde edilen veriler hem odun türünün hem de katman kalınlığının kayma modülü üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Özellikle göknar ve ladin gibi daha yoğun türlerden üretilen ÇLK malzemeler, kayma rijitliği gerektiren yapısal uygulamalarda kavak odununa kıyasla daha uygun bir seçenek sunmaktadır. Bu bulgular, ÇLK tasarımında hem tür hem de katman konfigürasyonunun optimizasyonunun, yapının performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.8: ÇLK malzemelerin kayma modülü.

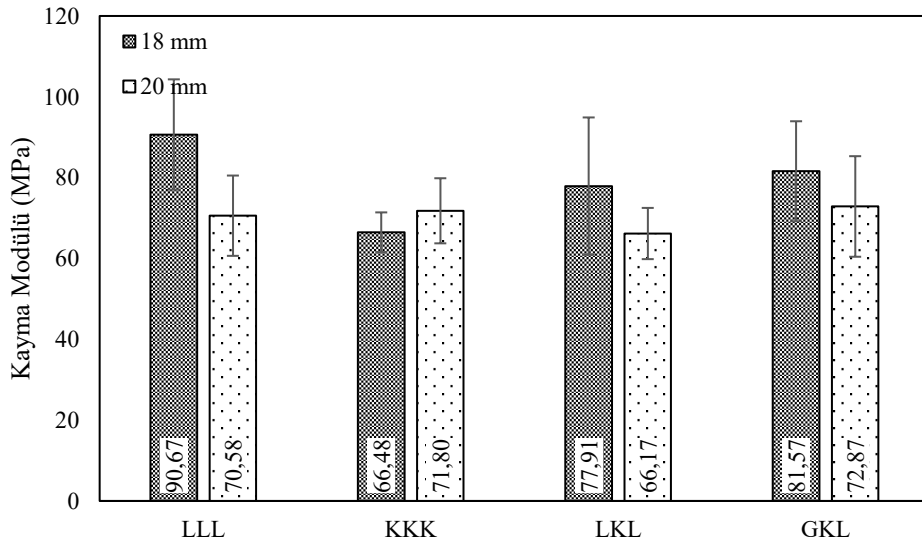
Şekil 4.9’da göknar ve kavak odun türlerinden üretilen hem kontrol (GGG, KKK) hem de hibrit (GKG, LKG) ÇLK malzemelere ait kayma modülü (MPa) değerleri, 18 mm ve 20 mm dış katman kalınlıkları dikkate alınarak sunulmuştur. Tüm gruplarda genel eğilim olarak 18 mm katman kalınlığındaki örneklerin, 20 mm kalınlığındakilere kıyasla daha yüksek kayma modülü değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, daha ince dış katmanların katmanlar arası kaymaya karşı daha dirençli olduğunu ve yük transferi sırasında daha rijit bir davranış sergilediğini göstermektedir.

Göknar esaslı kontrol grubu GGG’de, 18 mm kalınlığındaki örneklerin ortalama kayma modülü 92,48 MPa iken, 20 mm kalınlıkta bu değer 90,58 MPa olarak ölçülmüştür. Hibrit GKG grubunda ise 18 mm ve 20 mm dış katman kalınlıklarında kayma modülü sırasıyla 91,01 MPa ve 83,99 MPa olarak belirlenmiştir. GKG grubunun GGG grubuna benzer değerlere sahip olması, hibrit yapıdaki kavak ara

katmanın göknar dış katmanlarla birlikte yeterli yapışma ve bütünlük sağladığını göstermektedir. Ancak 20 mm kalınlıkta yaşanan düşüş, kalınlık arttıkça kayma rijitliğinde azalma eğilimi olabileceğini düşündürmektedir.

Kavak esaslı kontrol grubu KKK'de kayma modülü 18 mm'de 71,45 MPa, 20 mm'de 71,80 MPa olarak belirlenmiş olup, kalınlık değişiminin sınırlı etki yarattığı görülmektedir. Buna karşılık, hibrit LKG grubunda 18 mm kalınlığında 67,15 MPa, 20 mm kalınlığında ise 60,56 MPa değerleri ölçülmüştür. LKG grubundaki değerlerin, KKK grubuyla benzer veya daha düşük seviyelerde kalması, türler arası uyumun ve katmanlama düzeninin kayma davranışını doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Elde edilen bulgulara göre, kayma modülü bakımından en yüksek değerlere göknar esaslı gruplar (GGG ve GKG) ulaşmış, bunu kavak ve hibrit kombinasyonları takip etmiştir. Göknar odununun yüksek yoğunluğu ve daha iyi lif yapısı, katmanlar arası kayma direncini artırarak malzemenin daha rijit bir davranış sergilemesini sağlamaktadır. Hibrit yapılar, kontrollü ve uygun katman kombinasyonlarıyla kayma modülünü artırma potansiyeli sunsa da türler arası elastik uyumsuzluklar nedeniyle bu değerlerin düşebileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 4.9: Hibrit ÇLK malzemelerin kayma modülünün ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

Sonuç olarak hem tür seçimi hem de katman kalınlığı, kayma modülü üzerinde önemli etkiye sahiptir. Özellikle göknar gibi rijit türler, kayma gerilmelerine karşı daha avantajlı bir yapı sunarken, hibrit yapılar ise türler arası uyum sağlandığı takdirde dengeli performans sergileyebilir. Bu bulgular, yapısal uygulamalarda optimum

katman kombinasyonlarının belirlenmesinde dikkate alınması gereken kritik parametreleri ortaya koymaktadır.

Şekil 4.10'da, ladin ve kavak odun türlerinden üretilmiş kontrol (LLL, KKK) ve hibrit (LKL, GKL) ÇLK malzemelerin 18 mm ve 20 mm katman kalınlıklarına göre ölçülen kayma modülü değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Genel olarak, tüm gruplarda 18 mm kalınlığındaki numunelerin, 20 mm kalınlığındaki numunelere kıyasla daha yüksek kayma modülüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, daha ince katmanların kesme kuvvetlerine karşı daha dirençli davrandığını ve katmanlar arası deformasyonun sınırlandığını göstermektedir.

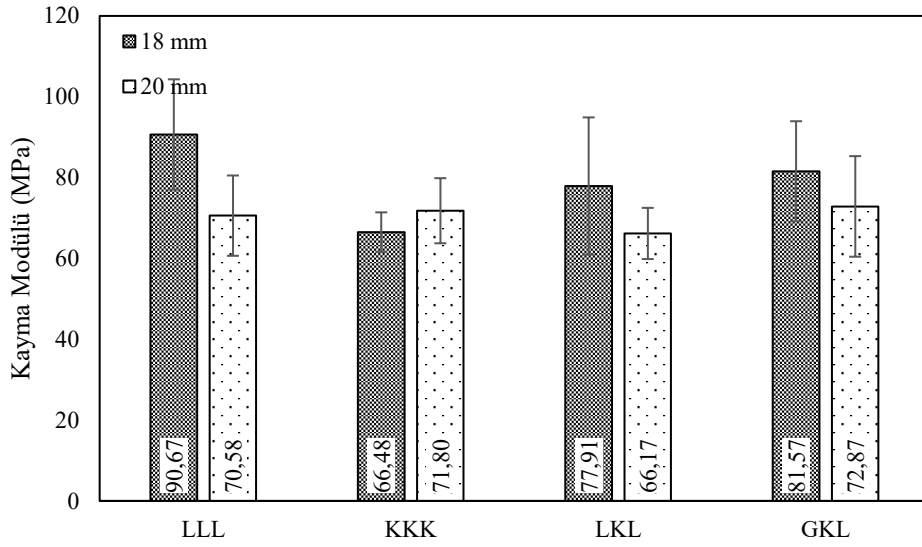
Ladin esaslı kontrol grubu LLL'de, 18 mm kalınlığındaki örneklerin ortalama kayma modülü 90,67 MPa, 20 mm'de ise 70,58 MPa olarak ölçülmüştür. Hibrit LKL grubunda bu değerler sırasıyla 72,01 MPa (18 mm) ve 66,17 MPa (20 mm) olarak belirlenmiştir. LKL grubunun LLL grubuna kıyasla daha düşük kayma modülü göstermesi, hibrit yapıda kavak katmanlarının yer almasının rijitliği azalttığını ancak sınırlı düzeyde olduğunu göstermektedir.

Kavak esaslı kontrol grubu KKK'de ise 18 mm kalınlıkta kayma modülü 66,41 MPa, 20 mm kalınlıkta 71,80 MPa olarak elde edilmiştir. Katman kalınlığına bağlı bu artış, kavak odununun düşük yoğunluklu yapısının kalın katmanlarda daha homojen gerilme dağılımı sağlamasından kaynaklanabilir. Buna karşın, hibrit GKL grubunda 18 mm ve 20 mm kalınlıkta kayma modülü değerleri sırasıyla 81,57 MPa ve 72,87 MPa olarak belirlenmiştir. GKL grubunun KKK'ye göre daha yüksek değerler sunması, kavak esaslı yapıların hibrit kombinasyonlarla kayma dayanımının artırılabilceğini göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, ladin odununun kontrol grubu olarak yüksek kayma rijitliği sunduğunu; hibrit tasarımların ise bu rijitliği tür kombinasyonlarına bağlı olarak koruyabildiğini ya da sınırlı düzeyde kayba uğradığını ortaya koymaktadır. Özellikle GKL grubunun, kavak esaslı kontrol grubuna göre daha yüksek kayma modülü değerleri göstermesi, hibrit yapıların doğru katman seçimiyle mekanik performans açısından avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak hem katman kalınlığı hem de kullanılan odun türü ÇLK yapısının kayma davranışı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Ladin odunundan elde edilen ÇLK'ler yüksek rijitlik özellikleri ile dikkat çekerken, kavak gibi düşük yoğunluklu türlerin

uygun hibrit yapılar içinde kullanılması hem kaynak verimliliği hem de mekanik performans bakımından etkili bir strateji sunmaktadır.



Şekil 4.10: Hibrit ÇLK malzemelerin kayma ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

Çizelge 4.15’e göre ÇLK malzemelerin kayma modülü özelliğinde odun türü (p -değeri $\leq 0,05$) ve katman kalınlığı (p -değeri $\leq 0,05$) istatistiksel olarak önemli iken katmanlarda kullanılan odun türü ve katman kalınlığı etkileşiminin (p -değeri $> 0,05$) ise istatistiksel olarak gruplar arasında bir farklılık ortaya koyduğu gösteren yeterli kanıt yoktur. Odun türü ve katman kalınlığı ÇLK malzemelerin eğilme direncindeki değişimin %49,5’ini kapsamaktadır.

Çizelge 4.15: ÇLK malzemelerin kayma modülü için iki-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Odun Türü	5342,46	6	890,41	6,90	$\leq 0,001$
Katman Kalınlığı	772,50	1	772,50	5,99	0,018
Odun Türü * Katman Kalınlığı	960,19	6	160,03	1,24	0,300
$R^2 = 0,495$					

Çizelge 4.16’da ÇLK malzemelerin kayma modülü için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Aynı harf değerine sahip olmayan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Çizelge 4.16: ÇLK malzemelerin kayma modülü için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.

Örnek	N	Gruplama		
LKG20	5	A		
LKL20	5	A	B	
KKK18	5	A	B	
LKG18	5	A	B	C
LLL20	5	A	B	C
KKK20	5	A	B	C
GKL20	5	A	B	C
LKL18	5	A	B	C
GKL18	5	A	B	C
GKG20	5	A	B	C
GKG18	5		B	C
LLL18	5		B	C
GGG20	5		B	C
GGG18	5			C

4.4 Yuvarlama Kesme Dayanımı

Şekil 4.11’de, farklı odun türlerinden üretilmiş ÇLK örneklerinin 18 mm ve 20 mm dış katman kalınlığına göre ölçülen yuvarlanma kesme dayanımı (MPa) değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yuvarlanma kesme dayanımı, CLT yapılarında lif yönüne dik yükleme altında ara katmanlarda meydana gelen makaslama etkisinin değerlendirilmesi açısından kritik bir mekanik parametredir.

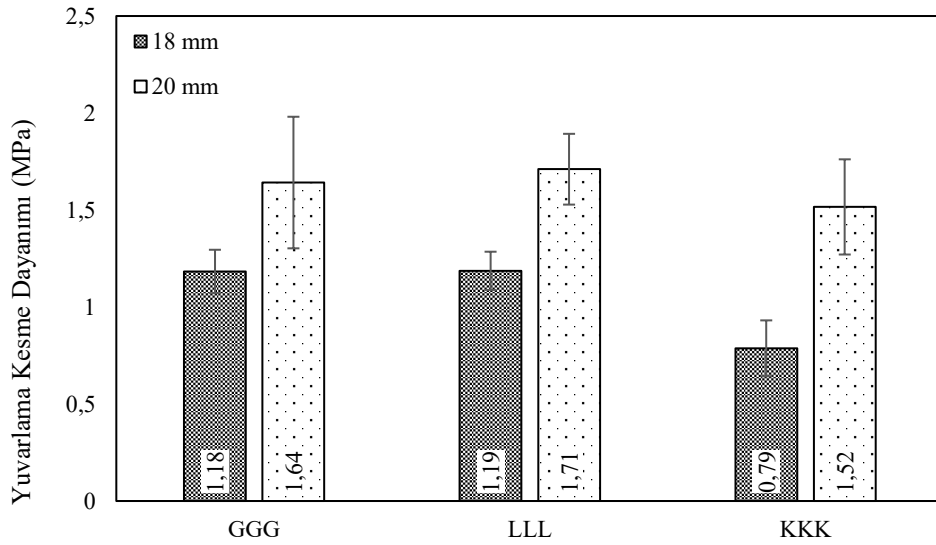
Genel olarak tüm örnek gruplarında, 20 mm katman kalınlığına sahip numunelerin, 18 mm kalınlığındakilere kıyasla daha yüksek yuvarlanma kesme dayanımı gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, daha kalın dış katmanların yuvarlanma etkisine karşı daha yüksek direnç sunduğunu ve yük dağılımında daha etkin performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

GGG grubunda, 18 mm kalınlığındaki örneklerin ortalama yuvarlanma kesme dayanımı 1,18 MPa iken, 20 mm kalınlığında bu değer 1,64 MPa’a yükselmiştir. Benzer şekilde LLL grubunda, değerler sırasıyla 1,17 MPa (18 mm) ve 1,71 MPa (20 mm) olarak belirlenmiştir. En düşük değerlere sahip olan kavak esaslı KKK grubunda ise 18 mm ve 20 mm kalınlıklardaki değerler sırasıyla 0,87 MPa ve 1,52 MPa olarak kaydedilmiştir.

Bu sonuçlar, göknar ve ladin gibi yüksek yoğunluklu türlerin kavak odununa kıyasla daha yüksek yuvarlanma kesme dayanımı sunduğunu göstermektedir. Ancak tüm

türlerde gözlenen artış eğilimi, kalınlığın önemli bir yapısal parametre olduğunu ve yuvarlanma tipi kesme davranışı üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir.

Sonuç olarak hem odun türü hem de katman kalınlığı, yuvarlanma kesme dayanımı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yük taşıma kapasitesinin sınırlı olduğu ÇLK uygulamalarında, özellikle ara katmanlardaki kayma gerilmelerinin karşılanmasında bu parametrelerin optimize edilmesi, yapısal güvenlik ve performans açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 4.11: ÇLK malzemelerin yuvarlanma kesme dayanımı.

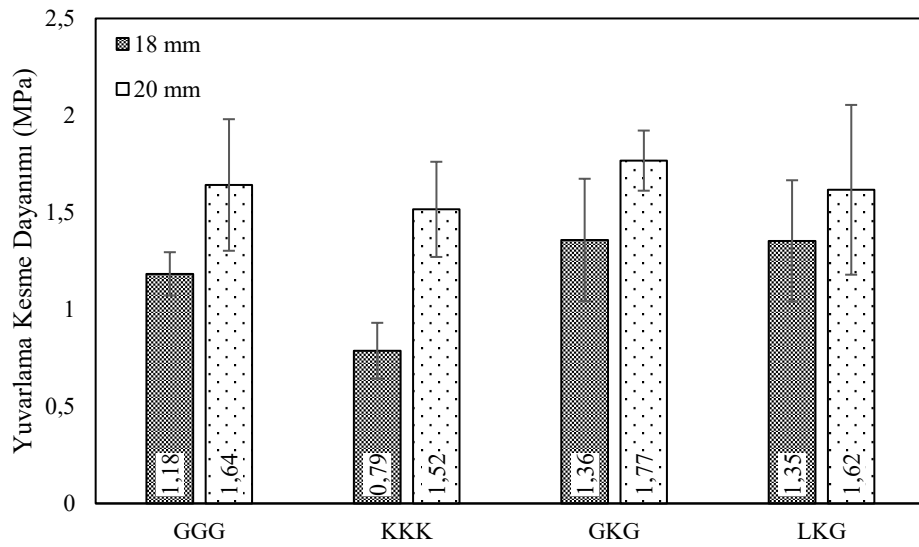
Şekil 4.12’de, göknar ve kavak odun türlerinden üretilmiş kontrol (GGG, KKK) ve hibrit (GKG, LKG) ÇLK malzemelere ait yuvarlanma kesme dayanımı değerleri, 18 mm ve 20 mm dış katman kalınlıkları dikkate alınarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur.

Tüm gruplarda, 20 mm dış katman kalınlığına sahip numunelerin, 18 mm kalınlıktaki numunelere kıyasla daha yüksek yuvarlanma kesme dayanımı sunduğu görülmektedir. Bu durum, artan katman kalınlığının, özellikle ara katmanda oluşan kayma gerilmelerini daha etkin şekilde taşıyabildiğini ve yapısal rijitliği artırdığını göstermektedir.

Göknar esaslı kontrol grubu GGG’de yuvarlanma kesme dayanımı 18 mm dış katman kalınlığında 1,18 MPa, 20 mm’de ise 1,64 MPa olarak ölçülmüştür. Göknar-kavak-göknar yapısına sahip hibrit GKG grubunda ise bu değerler sırasıyla 1.36 MPa ve 1.77 MPa olarak belirlenmiştir. GKG grubunun GGG’ye kıyasla daha yüksek değer

sunması, kavak ara katmanın göknar dış katmanlarla etkili bir mekanik bütünlük oluşturduğunu ve yapısal performansa olumlu katkı sağladığını göstermektedir.

Benzer şekilde, kavak esaslı kontrol grubu KKK'de 18 mm ve 20 mm katman kalınlığındaki değerler sırasıyla 0.87 MPa ve 1.52 MPa olarak ölçülmüştür. Kavak-göknar-ladin yapısına sahip LKG hibrit grubunda ise 18 mm'de 1.31 MPa, 20 mm'de ise 1.62 MPa değerleri elde edilmiştir. LKG grubunun, KKK'ye kıyasla daha yüksek kesme dayanımı göstermesi, kavak odununun hibrit kompozisyonlarla mekanik olarak güçlendirilebileceğini ve özellikle yuvarlanma kesme dayanımı açısından daha güvenli bir yapı sağlayabileceğini göstermektedir



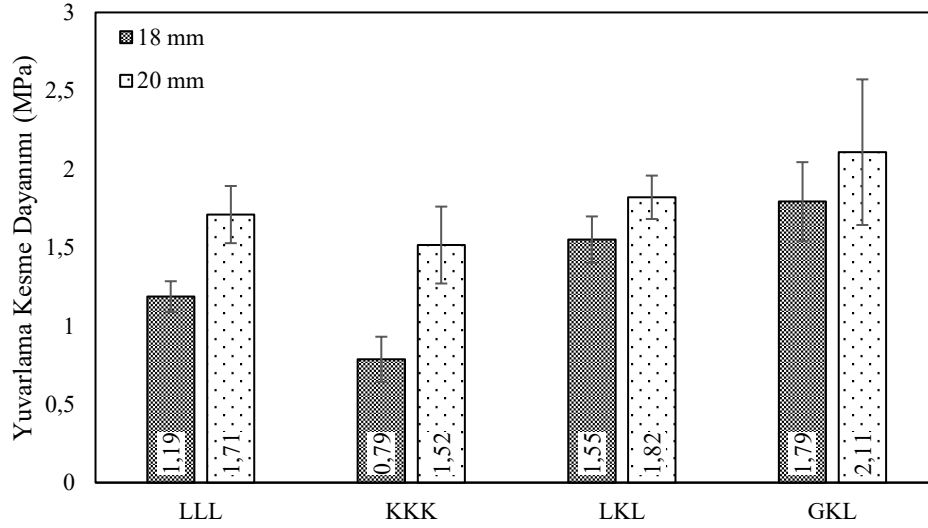
Şekil xx.

Şekil 4.12: Hibrit ÇLK malzemelerin yuvarlama kesme dayanımının göknar ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular hem odun türü hem de katman kalınlığı değişkenlerinin yuvarlanma kesme dayanımı üzerinde anlamlı etkileri olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle hibrit ÇLK malzemelerin, kontrol gruplarına kıyasla daha üstün performans sergilemesi, çok katmanlı ahşap yapı tasarımlarında uygun tür kombinasyonlarının, yapının hem dayanımını hem de deformasyon güvenliğini artırmak açısından etkili bir strateji olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.13'te, ladin ve kavak odun türlerine dayalı olarak üretilmiş kontrol (LLL, KKK) ve hibrit (LKL, GKL) ÇLK malzemelerin 18 mm ve 20 mm katman kalınlığına göre ölçülen yuvarlanma kesme dayanımı (MPa) değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tüm gruplarda ortak olarak gözlemlenen eğilim, 20 mm dış katman

kalınlığına sahip numunelerin, 18 mm kalınlıktakilere kıyasla daha yüksek yuvarlanma kesme dayanımı değerlerine sahip olmasıdır. Bu durum, artan katman kalınlığının yuvarlanma etkilerine karşı direnci artırarak yapının kesme davranışını iyileştirdiğini göstermektedir.



Şekil 4.13: Hibrit ÇLK malzemelerin yuvarlanma kesme dayanımının ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

Ladin esaslı kontrol grubu LLL’de, 18 mm kalınlığındaki örneklerin ortalama yuvarlanma kesme dayanımı 1,15 MPa, 20 mm kalınlıkta ise 1,71 MPa olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, kavak esaslı kontrol grubu KKK’de bu değerler sırasıyla 0,73 MPa ve 1,53 MPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, kavak odununun düşük yoğunluğu nedeniyle daha zayıf bir kesme direnci sunduğunu ortaya koymaktadır. Hibrit örnek gruplarından LKL’de, 18 mm katman kalınlığında yuvarlanma kesme dayanımı 1,32 MPa, 20 mm’de ise 1,92 MPa olarak elde edilmiştir. GKL grubunda ise bu değerler sırasıyla 1,76 MPa ve 2,11 MPa olarak kaydedilmiştir. GKL grubunun tüm gruplar arasında en yüksek değerlere ulaşması, çok bileşenli hibrit yapıların kesme dayanımı açısından daha avantajlı bir yapı sunduğunu göstermektedir. Bu durum, özellikle kavak gibi düşük mekanik özelliklere sahip odunların, yüksek performanslı türlerle birlikte kullanıldığında yapının zayıf noktalarını güçlendirebildiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, katman kalınlığı ve odun türü bileşimi, yuvarlanma kesme dayanımı üzerinde doğrudan etkili parametrelerdir. Ladin ve kavak türlerinin hibrit olarak birleştirildiği LKL ve GKL grupları, hem yapısal rijitlik hem de kayma direnci bakımından kontrol gruplarına göre daha üstün performans sergilemiş ve bu tür

hibritleşmenin, ÇLK gibi çok katmanlı ahşap yapı sistemlerinin daha güvenli ve dayanıklı tasarlanmasına olanak sunduğu gösterilmiştir.

Çizelge 4.17'ye göre ÇLK malzemelerin yuvarlama kesme dayanımı özelliğinde odun türü (p -değeri $\leq 0,05$) ve katman kalınlığı (p -değeri $\leq 0,05$) istatistiksel olarak önemli iken katmanlarda kullanılan odun türü ve katman kalınlığı etkileşiminin (p -değeri $> 0,05$) ise istatistiksel olarak gruplar arasında bir farklılık ortaya koyduğu gösteren yeterli kanıt yoktur. Odun türü ve katman kalınlığı ÇLK malzemelerin eğilme direncindeki değişimin %64,8'ini kapsamaktadır.

Çizelge 4.17: ÇLK malzemelerin yuvarlama kesme dayanımı için iki-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Odun Türü	3,68	6	0,61	8,73	≤ 0.001
Katman Kalınlığı	3,15	1	3,15	44,77	≤ 0.001
Odun Türü *	0,41	6	0,07	0,98	0,446
Katman Kalınlığı					
$R^2 = 0,648$					

Çizelge 4.18'de ÇLK malzemelerin yuvarlama kayma dayanımı için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Aynı harf değerine sahip olmayan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Çizelge 4.18: ÇLK malzemelerin yuvarlama kayma dayanımı için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.

Örnek	N	Gruplama			
KKK18	5	A			
GGG18	5	A	B		
LLL18	5	A	B		
LKG18	5	A	B	C	
GKG18	5	A	B	C	
KKK20	5		B	C	
LKL18	5		B	C	D
LKG20	5		B	C	D
GGG20	5		B	C	D
LLL20	5		B	C	D
GKG20	5		B	C	D
GKL18	5			C	D
LKL20	5			C	D
GKL20	5				D

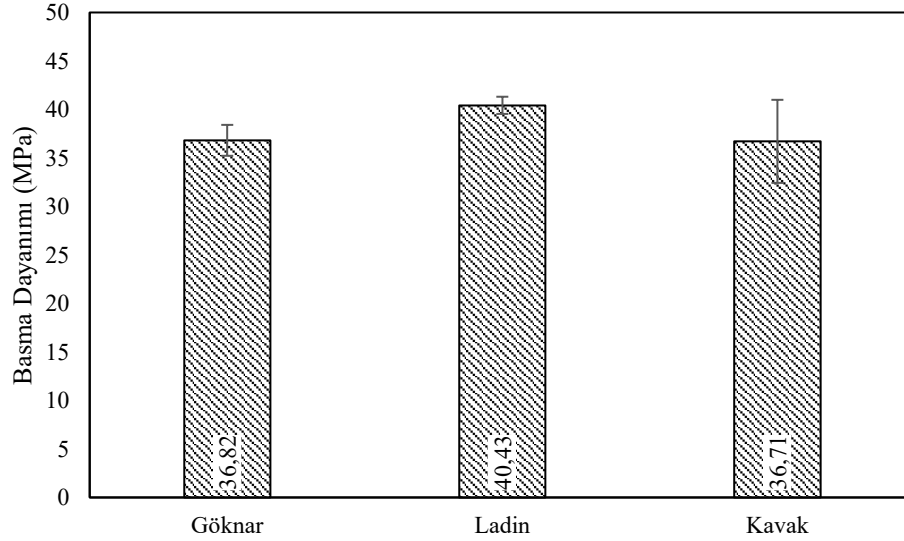
4.5 Basma Dayanımı

Şekil 4.14'te, farklı odun türlerinden (Gökmar, Ladin ve Kavak) elde edilen masif malzemelerin basma dayanımı değeri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Masif örneklerin lif doğrultusuna paralel olarak gerçekleştirilen basma testleri sonucunda, türler arasında mekanik performans bakımından anlamlı farklar olduğu gözlemlenmiştir.

En yüksek ortalama basma dayanımı değeri 40,43 MPa ile ladin odununda elde edilmiştir. Bu değeri, ladin türünün masif yapı elemanı olarak yüksek eksenel yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Gökmar ve kavak türleri ise sırasıyla 36,82 MPa ve 36,71 MPa basma dayanımı değeriyle benzer seviyelerde performans sergilemiştir. Her ne kadar gökmar ve kavak benzer dayanım değerlerine sahip olsa da, kavakta gözlemlenen hata çubuğunun (standart sapma) daha yüksek olması, bu türün örnekleri arasında daha büyük bir varyasyon olduğunu göstermekte, yani yapısal homojenliğin görece daha düşük olduğunu işaret etmektedir.

Bu sonuçlar, masif odun türleri arasında ladin odununun basma dayanımı açısından en üstün performansı sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Liflerin düzgün ve sık yapılı olması, yüksek yoğunluk ve düşük kusur oranı gibi anatomik özellikler bu dayanımın temel nedenleri arasında sayılabilir. Kavak odunu ise genellikle düşük yoğunluklu bir tür olmasına karşın, örneklerde sağlanan yeterli yapısal bütünlük sayesinde gökmar ile karşılaştırılabilir düzeyde basma dayanımı göstermiştir.

Sonuç olarak, masif malzeme kullanımı gerektiren yapısal uygulamalarda ladin odunu, yüksek basma dayanımı sayesinde öncelikli tercih olarak değerlendirilebilir. Ancak, ekonomik ve çevresel faktörler göz önünde bulundurulduğunda gökmar ve kavak türleri de uygun mühendislik tasarımları ve güvenlik katsayıları çerçevesinde kullanılabilir. Bu bağlamda, odun türü seçiminin sadece dayanım değerleriyle değil, aynı zamanda malzeme temin edilebilirliği, işlenebilirlik ve sürdürülebilirlik gibi kriterlerle birlikte ele alınması gerektiği vurgulanmalıdır.



Şekil 4.14: Masif malzemelerin basma dayanımı.

Çizelge 4.19'a göre masif malzemelerin vida tutma kapasitesi odun türü (p-değeri > 0,05) gruplar arasında bir farklılık olduğunu gösteren yeterli kanıt bulunamamaktadır.

Çizelge 4.19: Masif malzemelerin basma dayanımı için tek-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Gruplar arası	44,74	2	22,37	3,10	0,082
Gruplar içi	86,62	12	7,22		
Toplam	131,36	14			

Çizelge 4.20'de masif malzemelerin basma dayanımı için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Aynı harf değerine sahip olan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklı değildir.

Çizelge 4.20: Masif malzemelerin basma dayanımı için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.

Odun Türü	N	Gruplama
Kavak	5	A
Gökmar	5	A
Ladin	5	A

Şekil 4.15'te, farklı odun türlerinden (GGG, LLL ve KKK) üretilmiş ÇLK malzemelere ait basma dayanımı değerleri, 18 mm ve 20 mm dış katman kalınlıkları dikkate alınarak sunulmuştur. Genel olarak tüm gruplarda, dış katman kalınlığı arttıkça basma dayanımında artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu eğilim, daha kalın katmanların

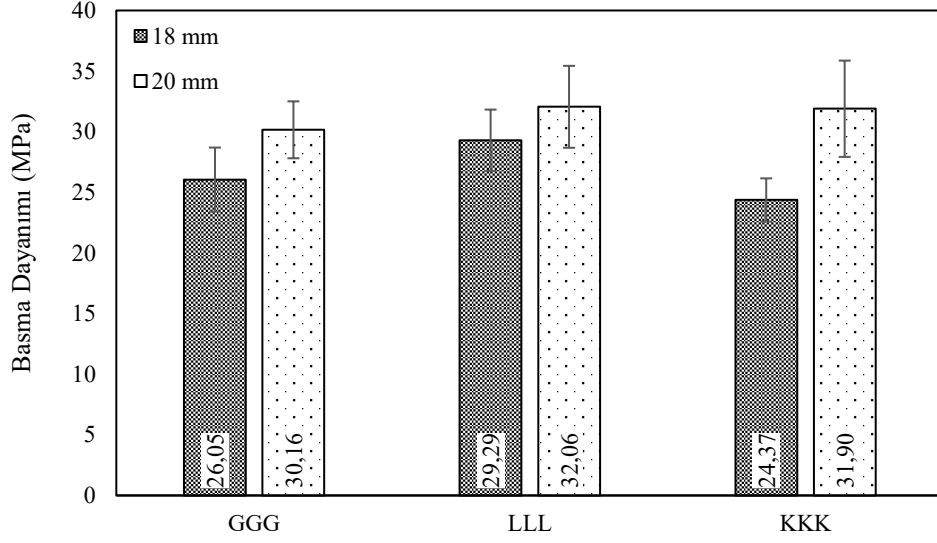
eksenel basma kuvvetlerini daha etkin biçimde taşıyabildiğini ve deformasyon oluşumunu geciktirdiğini göstermektedir.

Göknar esaslı GGG grubunda, 18 mm kalınlıkta ortalama basma dayanımı 26,05 MPa, 20 mm’de ise 30,16 MPa olarak ölçülmüştür. Ladin esaslı LLL grubunda bu değerler sırasıyla 29,25 MPa (18 mm) ve 32,06 MPa (20 mm) olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, özellikle ladin odunundan elde edilen ÇLK malzemelerin basma dayanımı açısından en yüksek performansı sunduğunu göstermektedir.

Kavak esaslı KKK grubunda ise 18 mm kalınlığındaki numunelerin ortalama basma dayanımı 21,57 MPa olup, 20 mm kalınlıkta bu değer 31,90 MPa’a yükselmiştir. Bu dikkate değer artış, düşük yoğunluklu kavak odununun kalın katmanlarla desteklendiğinde basma yönünde önemli ölçüde güçlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle 20 mm kalınlığındaki kavak örneklerinin, 18 mm’lik ladin örneklerine yakın hatta bazı durumlarda daha yüksek basma dayanımı sergilemesi, bu türün ekonomik avantajlarla birlikte yapısal uygulamalarda hibrit ya da destekleyici şekilde değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Basma dayanımı sonuçları ayrıca, kullanılan odun türünün yoğunluğu ve lif yapısına doğrudan bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ladin ve göknar türleri, genel olarak daha homojen yapıları ve yüksek mekanik performanslarıyla öne çıkarken; kavak türü, uygun kalınlık ve tasarım parametreleri ile benzer performans düzeyine ulaşabilmektedir.

Sonuç olarak hem katman kalınlığı hem de odun türü, ÇLK malzemelerin basma dayanımı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Elde edilen veriler, özellikle yapıların düşey taşıyıcı elemanlarında kullanılacak ÇLK malzemelerin boyutlandırılmasında, katman kalınlığı seçiminin optimize edilmesi gerektiğini ve düşük yoğunluklu türlerin kalın katmanlar halinde kullanılmasının dayanım açısından ciddi avantajlar sağlayabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.15: ÇLK malzemelerin basma dayanımı.

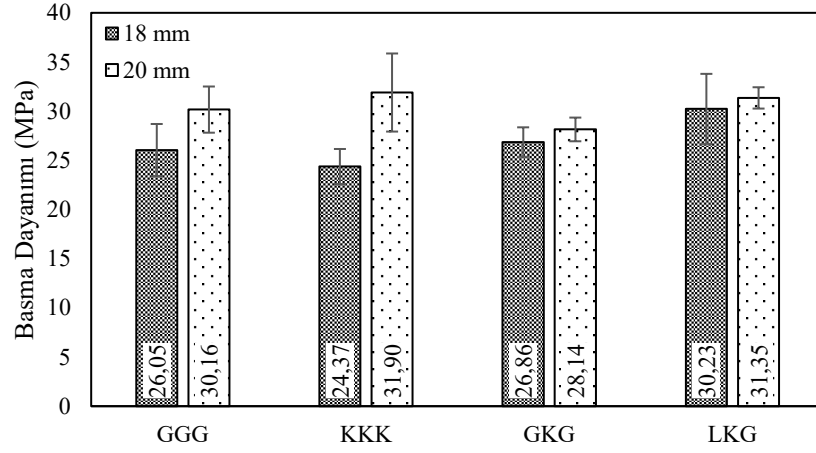
Şekil 4.16’da göknar ve kavak odun türlerinden elde edilen kontrol (GGG, KKK) ve hibrit (GKG, LKG) ÇLK malzemelerin 18 mm ve 20 mm katman kalınlıklarına göre ölçülen basma dayanımı (MPa) değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Genel olarak tüm örnek gruplarında, 20 mm katman kalınlığına sahip numuneler 18 mm kalınlığındaki numunelere kıyasla daha yüksek basma dayanımı göstermiştir.

Göknar esaslı kontrol grubu GGG’de basma dayanımı 18 mm kalınlığında 26,05 MPa, 20 mm’de ise 30,16 MPa olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, kavak esaslı KKK grubunda 18 mm’de 21,57 MPa, 20 mm’de ise 31,90 MPa’lık değerler elde edilmiştir. KKK grubunda gözlemlenen belirgin artış, kavak odununun düşük yoğunluğuna rağmen kalın katmanlarla güçlendirilerek basma dayanımının anlamlı ölçüde artırılabilceğini göstermektedir.

Hibrit örnekler değerlendirildiğinde, göknar-kavak-göknar (GKG) grubunda 18 mm kalınlıkta basma dayanımı 28,03 MPa, 20 mm’de 31,14 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler, GKG’nin GGG’ye yakın veya kısmen üstün mekanik performans gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Ladin-kavak-göknar bileşenlerinden oluşan LKG grubunda ise 18 mm’de 30,57 MPa, 20 mm’de 33,15 MPa’lık değerlerle tüm gruplar arasında en yüksek basma dayanımı elde edilmiştir. Bu sonuç, farklı türlerin uygun kombinasyonu ile oluşturulan hibrit yapının, kontrollü katman düzenlemesiyle birlikte optimize edilmiş mekanik dayanım sağlayabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak hem odun türü hem de katman kalınlığı, ÇLK malzemelerin basma dayanımı üzerinde belirleyici etkiler yaratmaktadır. Göknar ve kavak odunlarının

hibrit kombinasyonları, yapının dayanımını artırmakla kalmayıp aynı zamanda düşük yoğunluklu türlerin daha etkin değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu bulgular, taşıyıcı sistemlerin düşey yük taşıyan elemanlarının tasarımında hibrit ÇLK yapılarının önemli bir alternatif olabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.16: Hibrit ÇLK malzemelerin basma dayanımının göknar ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

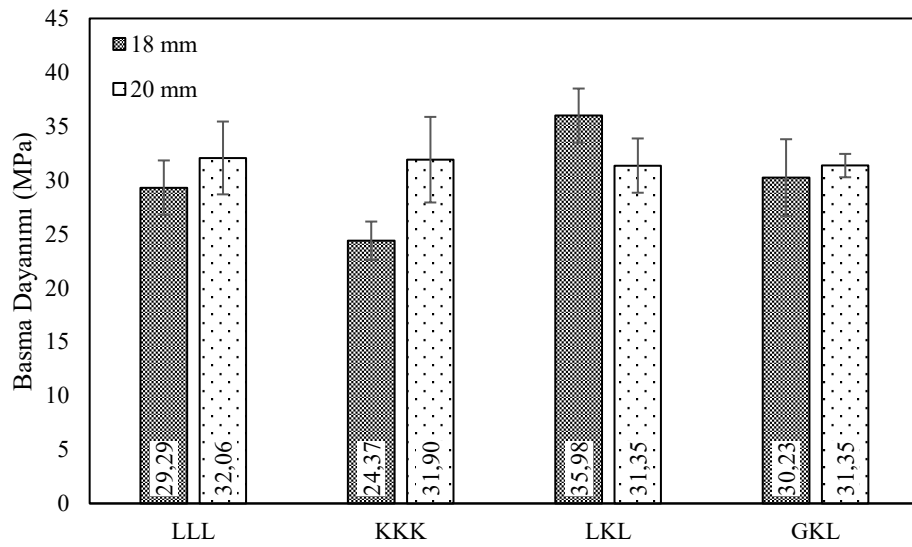
Şekil 4.17’de, ladin ve kavak odun türlerinden üretilmiş kontrol (LLL, KKK) ve hibrit (LKL, GKL) ÇLK malzemelerin 18 mm ve 20 mm dış katman kalınlıklarına göre ölçülen basma dayanımı değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Genel eğilim olarak, 20 mm kalınlığa sahip numuneler 18 mm kalınlıktakilere kıyasla daha yüksek basma dayanımı göstermiştir.

Ladin esaslı kontrol grubu LLL’de 18 mm kalınlığında ortalama basma dayanımı 29,25 MPa, 20 mm’de ise 32,06 MPa olarak ölçülmüştür. Kavak esaslı kontrol grubu KKK’de ise bu değerler sırasıyla 21,17 MPa ve 31,90 MPa olup, özellikle 20 mm kalınlığındaki kavak örneklerinde dikkate değer bir artış gözlenmiştir. Bu bulgu, düşük yoğunluklu kavak odununun kalın katmanlarla desteklenmesi halinde taşıyıcı kapasitesinin önemli ölçüde artırılabilceğini göstermektedir.

Hibrit gruplar incelendiğinde, ladin-kavak-ladin (LKL) grubunda 18 mm kalınlıkta basma dayanımı 33,08 MPa ile tüm gruplar arasında en yüksek değere ulaşmıştır. Bu grup için 20 mm kalınlığındaki değer ise 31,15 MPa olup hafif bir azalma gözlenmiştir; bu durum üretim parametreleri veya numune içi boşlukların etkisine bağlı olabilir. Diğer hibrit grup olan göknar-kavak-ladin (GKL) ise 18 mm’de 30,37 MPa, 20 mm’de 31,35 MPa ile dengeli ve yüksek basma performansı sergilemiştir. GKL grubunun, kavak esaslı kontrol grubu olan KKK’ye göre daha yüksek ve tutarlı değerler sunması,

kavak katmanlarının uygun türlerle hibritlenmesi durumunda yapının genel taşıma kapasitesinin artırılabilirliğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular hem odun türü hem de katman kalınlığının basma dayanımı üzerinde belirgin etkileri olduğunu göstermektedir. Özellikle LKL ve GKL gibi hibrit yapılar, yalnızca dayanımı artırmakla kalmamakta, aynı zamanda düşük yoğunluklu türlerin mühendislik açısından daha etkili biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda, uygun katman kombinasyonlarıyla tasarlanan hibrit ÇLK malzemeler hem dayanım hem de malzeme verimliliği açısından sürdürülebilir yapısal çözümler sunma potansiyeline sahiptir.



Şekil 4.17: Hibrit ÇLK malzemelerin basma dayanımının ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

Çizelge 4.21'e göre ÇLK malzemelerin basma dayanımı özelliğinde odun türü (p -değeri $\leq 0,05$), katman kalınlığı (p -değeri $\leq 0,05$) ve odun türü ile katman kalınlığı arasındaki etkileşim (p -değeri $\leq 0,05$) istatistiksel olarak önemlidir. Odun türü ve katman kalınlığı ÇLK malzemelerin eğilme direncindeki değişimin %59,6'ını kapsamaktadır.

Çizelge 4.21: ÇLK malzemelerin basma dayanımı için iki-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Odun Türü	284,47	6	47,41	7,11	$\leq 0,001$
Katman Kalınlığı	62,90	1	62,91	9,44	0,003
Odun Türü * Katman Kalınlığı	203,93	6	33,99	5,09	$\leq 0,001$
R ² = 0,596					

Çizelge 4.22’de ÇLK malzemelerin basma dayanımı için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Aynı harf değerine sahip olmayan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Çizelge 4.22: ÇLK malzemelerin basma dayanımı için Tukey ortalama karşılaştırma analizi

Örnek	N	Gruplama			
KKK18	5	A			
GGG18	5	A	B		
GKG18	5	A	B	D	
GKG20	5	A	B	D	
LLL18	5	A	B	D	
GGG20	5		B	D	
GKL18	5		B	D	
LKG18	5		B	D	
LKL20	5		B	D	E
GKL20	5		B	D	E
LKG20	5		B	D	E
KKK20	5			D	E
LLL20	5			D	E
LKL18	5				E

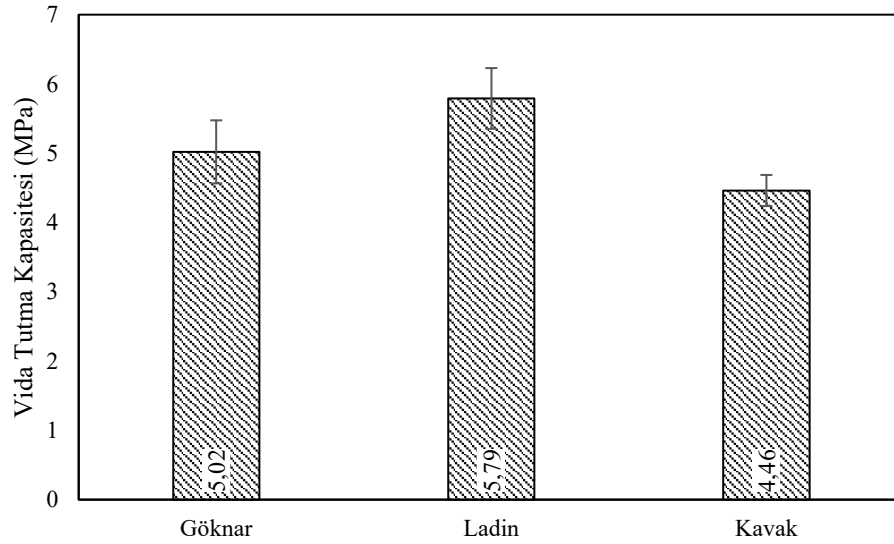
4.6 Vida Tutma Kapasitesi

Şekil 4.18’de, farklı masif odun türlerine (Gök nar, Ladin, Kavak) ait ortalama vida tutma kapasitesi değerleri sunulmuştur. Vida tutma kapasitesi, özellikle ahşap malzemelerin bağlantı elemanlarıyla birleştirilmesinde yapısal bütünlüğün sürdürülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Deneysel sonuçlar, odun türü ile vida tutma performansı arasında anlamlı farklılıklar olduğunu göstermektedir.

En yüksek ortalama vida tutma kapasitesi 5,79 MPa ile ladin odununda elde edilmiştir. Bu sonuç, ladin türünün daha sık lif yapısı ve yüksek yoğunluğu sayesinde mekanik bağlantılarda vida tutuculuğu bakımından diğer türlere kıyasla daha üstün olduğunu ortaya koymaktadır. Gök nar odunu, 5.02 MPa değerle ikinci sırada yer almakta ve vida tutma kapasitesi açısından kabul edilebilir düzeyde bir performans göstermektedir. Kavak ise 4,46 MPa ile en düşük ortalama değeri sunmuştur. Kavak odununun düşük yoğunluğu ve liflerin daha gözenekli yapıda olması, vida dişlerinin tam olarak kavranamamasına neden olmakta ve bu durum vida bağlantılarında mukavemeti azaltmaktadır.

Bu bulgular ışığında, vida bağlantılarının yoğun olarak kullanıldığı iç mekân elemanları veya yarı taşıyıcı yapısal birleşimler gibi uygulamalarda ladin odununun öncelikli tercih edilmesi önerilmektedir. Ancak göknar türü de ekonomik ve sürdürülebilirlik açısından uygun bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Kavak odunu ise düşük bağlantı kapasitesi nedeniyle yalnızca düşük yüklemeli ve geçici birleşimlerde, ya da desteklenmiş bağlantı sistemleriyle kullanıldığında tercih edilmelidir.

Sonuç olarak, vida tutma kapasitesi bakımından malzeme türü belirleyici bir faktördür ve bu parametre hem bağlantı güvenliği hem de uzun vadeli yapısal dayanıklılık açısından tasarım sürecine doğrudan dahil edilmelidir.



Şekil 4.18: Masif malzemelerin vida tutma kapasitesi.

Çizelge 4.23'e göre masif malzemelerin vida tutma kapasitesi için (p -değeri $> 0,05$) gruplar arasında bir farklılık olduğunu gösteren yeterli kanıt bulunamamaktadır.

Çizelge 4.23: Masif malzemelerin vida tutma kapasitesi için tek-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Gruplar arası	1,04	2	0,52	3,35	0,07
Gruplar içi	1,86	12	0,15		
Toplam	2,89	14			

Çizelge 4.24'te masif malzemelerin vida tutma kapasitesi için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Aynı harf değerine sahip olan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklı değildir.

Çizelge 4.24: Masif malzemelerin vida tutma kapasitesi için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.

Odun Türü	N	Gruplama
Kavak	5	A
Gökmar	5	A
Ladin	5	A

Şekil 4.19’da farklı odun türlerinden üretilmiş ÇLK örneklerinin 18 mm ve 20 mm dış katman kalınlıklarına göre ölçülen vida tutma kapasitesi değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

GGG grubunda, 18 mm kalınlıkta vida tutma kapasitesi 5,68 MPa iken, 20 mm kalınlıkta bu değer 5,79 MPa’ya yükselmiştir. Her iki kalınlıkta da elde edilen değerler, masif gökmar odununun vida tutma kapasitesine (yaklaşık 5,02 MPa) kıyasla daha yüksektir. Bu durum, ÇLK yapının katmanlar arası lif yönelimi ve yapıştırıcı katkısı sayesinde bağlantı bölgelerinde daha etkin bir mekanik ankraj sağladığını göstermektedir.

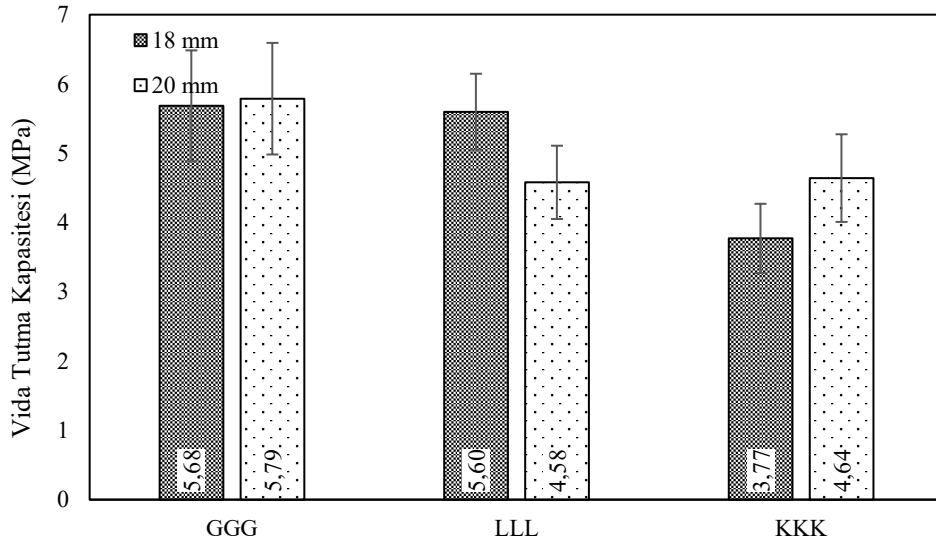
LLL grubunda, 18 mm kalınlığındaki örneklerde vida tutma kapasitesi 5,67 MPa ile oldukça yüksek bir değer sunarken, 20 mm kalınlıkta bu değer 4,53 MPa’a düşmüştür. Bu farklılık, numuneler arası varyasyonlardan (yıllık halka açısı) veya kalın katmanlarda oluşabilecek katmanlar arası yapışma eksikliklerinden kaynaklanabilir. Öte yandan, 18 mm kalınlığındaki LLL numunesinin masif ladin örneğine (5.76 MPa) oldukça yakın hatta bazı durumlarda daha yüksek bir kapasite sunduğu görülmektedir.

KKK grubunda, 18 mm ve 20 mm kalınlıklar için vida tutma kapasitesi sırasıyla 3,71 MPa ve 4,64 MPa olarak ölçülmüştür. Masif kavak odununda ölçülen değer 4,46 MPa olduğu göz önünde bulundurulduğunda, özellikle 20 mm kalınlıktaki kavak ÇLK numunesinin vida tutma kapasitesi açısından masif örneğe çok yakın, hatta eşdeğer olduğu söylenebilir. Ancak 18 mm kalınlıkta belirgin bir düşüş yaşandığı dikkat çekmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, ÇLK yapıların vida tutma kapasitesi masif malzemelere kıyasla artırılabilen ya da korunabilmektedir. Bu artış, yapısal yapıştırıcı katkısı, katman sayısı, yıllık halkanın açısı ve lif yönelimi gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar, malzeme türüne ve katman kalınlığına bağlı olarak vida bağlantı performansının

değişebileceğini ve her durum için ayrı değerlendirme yapılması gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, özellikle göknar ve ladin odunundan üretilmiş ÇLK malzemeler, vida tutma kapasitesi açısından yüksek performans sergilemiş ve masif malzeme eşdeğerlerini aşabilmiştir. Kavak odununda ise katman kalınlığı arttıkça vida tutma kapasitesinde iyileşme görülmekte olup, bu türün de uygun mühendislik uygulamalarıyla bağlayıcı sistemler içinde verimli şekilde kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, vida bağlantı elemanları kullanılan ahşap yapılarda, ÇLK tasarımında hem tür hem de katman kalınlığı seçiminde dikkatli optimizasyon yapılması gerektiği vurgulanmalıdır.



Şekil 4.19: ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesi.

Şekil 4.20’de, göknar ve kavak odunu kullanılarak üretilmiş kontrol (GGG, KKK) ve hibrit (GKG, LKG) ÇLK malzemelerin, farklı dış katman kalınlıklarında (18 mm ve 20 mm) ölçülen vida tutma kapasitesi değerleri sunulmaktadır. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar hem odun türünün hem de katman kalınlığının vida bağlantılarındaki performansa etkisini ortaya koymaktadır.

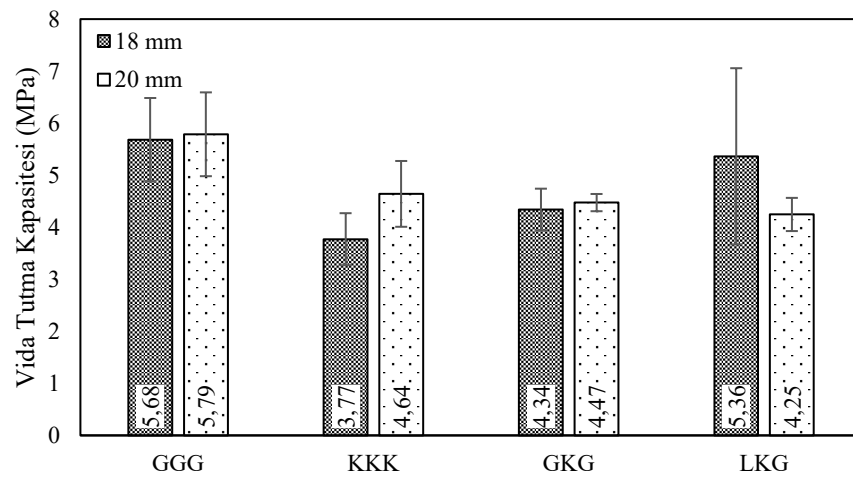
Göknar esaslı ÇLK örnekleri arasında karşılaştırıldığında, GGG kontrol grubunda 18 mm ve 20 mm kalınlıklarda sırasıyla 5,68 MPa ve 5,79 MPa değerleri elde edilmiştir. Hibrit yapıdaki GKG örneğinde ise bu değerler sırasıyla 4,87 MPa ve 4,57 MPa olarak belirlenmiştir. Bu durum, hibrit yapıdaki katman farklılığının vida tutma kapasitesi üzerinde negatif bir etki oluşturduğunu ve yapısal bütünlüğün azaldığını göstermektedir. Özellikle dış katmanlarda farklı türlerin kullanımı, vidanın sıkıldığı

bölgelerde homojenliğin azalmasına ve mekanik ankrajın zayıflamasına neden olmuş olabilir.

Kavak odunu esaslı örneklerde, KKK kontrol grubunda 18 mm kalınlıkta 3,71 MPa, 20 mm kalınlıkta ise 4,64 MPa'lık vida tutma kapasitesi elde edilmiştir. Bu değerler, göknara kıyasla daha düşük olsa da kavak gibi düşük yoğunluklu türler için kabul edilebilir düzeydedir. LKG hibrit örneğinde ise 18 mm ve 20 mm kalınlıklar için ölçülen değerler sırasıyla 3,75 MPa ve 4,25 MPa olmuştur. Hibrit kavak örneklerinde, vida tutma kapasitesi kontrol grubuna kıyasla belirgin bir düşüş göstermemiştir; bu durum, kavak odununun lif yapısının farklı türle birlikte kullanımında görece daha uyumlu olabileceğini göstermektedir.

Genel olarak, göknar odunu esaslı ÇLK malzemeler kavak odununa göre daha yüksek vida tutma kapasitesi sunmuş, ancak hibrit yapı ile birleştiklerinde bu avantajın kısmen azaldığı görülmüştür. Katman kalınlığındaki artışın, göknar örneklerinde olumlu, kavak örneklerinde ise daha dengeli bir etki yarattığı söylenebilir. Hibrit yapıların vida bağlantı elemanları açısından performansı, özellikle dış katmanda kullanılan türün yoğunluğu ve lif yönelimi ile yakından ilişkilidir.

Bu sonuçlar doğrultusunda, vida bağlantılarının yoğun olarak kullanıldığı ahşap yapı uygulamalarında hem odun türü seçimi hem de hibrit katman yerleşimi dikkatle değerlendirilmelidir. Özellikle göknar gibi yüksek vida tutma performansı sunan türlerde, hibrit yapı tasarlanırken dış katmanların mümkün olduğunca aynı türden seçilmesi önerilmektedir. Bu sayede, bağlantı dayanımı maksimize edilerek yapısal güvenlik artırılabilir.



Şekil 4.20: Hibrit ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesinin göknar ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

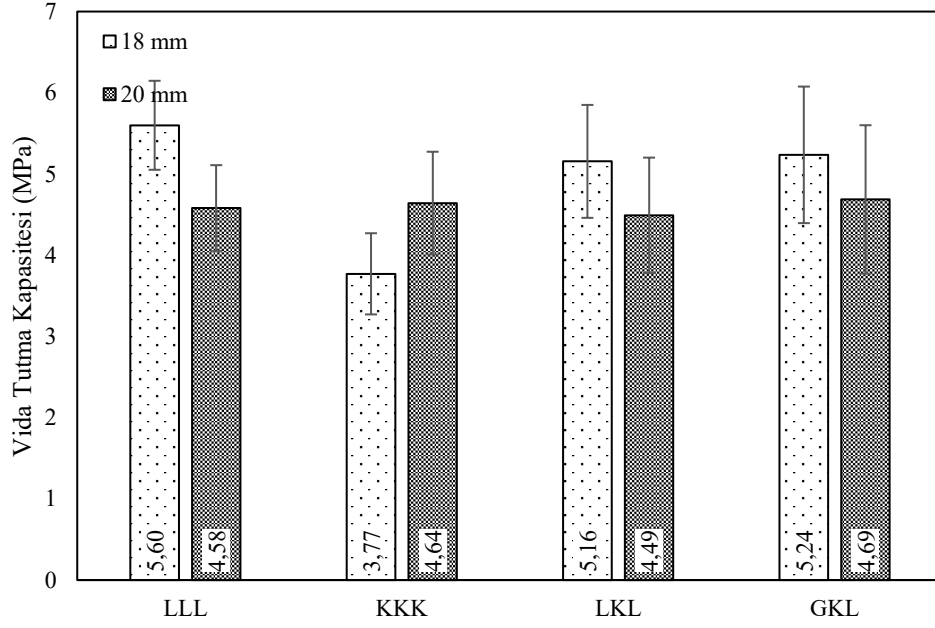
Şekil 4.21’de, ladin ve kavak odunu esaslı kontrol (LLL, KKK) ve hibrit (LKL, GKL) ÇLK malzemelerin 18 mm ve 20 mm dış katman kalınlıklarında ölçülen vida tutma kapasiteleri (MPa) karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bu analiz, hem katman kalınlığının hem de hibrit yapı konfigürasyonunun vida bağlantılarındaki mekanik performans üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır.

Ladin esaslı kontrol örneği (LLL), 18 mm kalınlıkta 5,60 MPa, 20 mm’de ise 5,15 MPa vida tutma kapasitesi ile deney grubunun en yüksek değerlerinden birini göstermiştir. Bu sonuç, ladin odununun vida bağlantıları açısından uygun bir iç yapıya ve yeterli yoğunluğa sahip olduğunu işaret etmektedir. Buna karşın, hibrit yapıdaki LKL örneğinde değerler 18 mm ve 20 mm için sırasıyla 5,16 MPa ve 4,95 MPa olarak tespit edilmiştir. Hibrit yapıdaki düşüş, özellikle dış katman ile iç katman arasında oluşan malzeme farklılığının, vida tutunmasını olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Kavak odunu esaslı örnekler incelendiğinde, kontrol grubu olan KKK örneği, 18 mm ve 20 mm kalınlıklarda sırasıyla 3,71 MPa ve 4,64 MPa vida tutma kapasitesi sergilemiştir. Hibrit yapıdaki GKL örneği ise 18 mm’de 5,32 MPa, 20 mm’de 4,95 MPa’lık değerler göstermiştir. Kavak odunu için hibrit yapıda elde edilen değerler kontrol örneğinden yüksek çıkmış ve bu durum, hibrit konfigürasyonda dış katmanlara yerleştirilen farklı türlerin (örneğin ladin veya göknar) kavak odununa kıyasla daha yüksek vida tutma performansı sağlamasıyla ilişkilendirilebilir.

Sonuç olarak, ladin odunu kontrol örnekleri, homojen yapısı sayesinde vida tutma performansında daha istikrarlı ve yüksek değerler sunarken, kavak odunu esaslı hibrit örnekler, farklı türlerin dış katmanlara entegrasyonu sayesinde performans artışı göstermiştir. Bu bulgular, hibrit yapıların uygun katman yerleşimiyle düşük yoğunluklu türlerde vida bağlantı performansını iyileştirebileceğini göstermektedir. Ancak, dış katmanda kullanılan malzemenin yoğunluk, lif yapısı ve vida ile temas eden alan özellikleri dikkate alınarak seçilmesi gerektiği de açıktır.

Bu bağlamda, özellikle hafif yapı sektörlerinde vida bağlantılarının taşıyıcı olmadığı ancak dayanım ve kalıcılık gerektiren uygulamalarda hibrit ÇLK yapıları, optimum tür kombinasyonlarıyla avantaj sağlayabilir.



Şekil 4.21: Hibrit ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesinin ladin ve kavak odun türleri üzerinden değerlendirilmesi.

Çizelge 4.25'e göre ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesi özelliğinde sadece odun türü (p -değeri $\leq 0,05$) istatistiksel olarak önemlidir. Katman kalınlığı (p -değeri $> 0,05$) ve odun türü ile katman kalınlığı arasındaki etkileşimin (p -değeri $> 0,05$) ise istatistiksel olarak gruplar arasında bir farklılık ortaya koyduğu gösteren yeterli kanıt yoktur. Odun türü ve katman kalınlığı ÇLK malzemelerin eğilme direncindeki değişimin %42,5'ini kapsamaktadır.

Çizelge 4.25: ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesi için iki-yönlü varyans analizi.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Odun Türü	14,67	6	2,44	4,17	0,002
Katman Kalınlığı	1,80	1	1,80	3,07	0,085
Odun Türü * Katman Kalınlığı	7,75	6	1,29	2,20	0,056
R ² = 0,425					

Çizelge 4.26'da ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesi için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Aynı harf değerine sahip olmayan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Çizelge 4.26: ÇLK malzemelerin vida tutma kapasitesi için Tukey ortalama karşılaştırma analizi.

Örnek	N	Gruplama	
KKK18	5	A	
LKG20	5	A	B
GKG18	5	A	B
GKG20	5	A	B
LKL20	5	A	B
LLL20	5	A	B
KKK20	5	A	B
GKL20	5	A	B
LKL18	5	A	B
GKL18	5	A	B
LKG18	5	A	B
LLL18	5		B
GGG18	5		B
GGG20	5		B

4.7 Bindirme Kayma Dayanımı

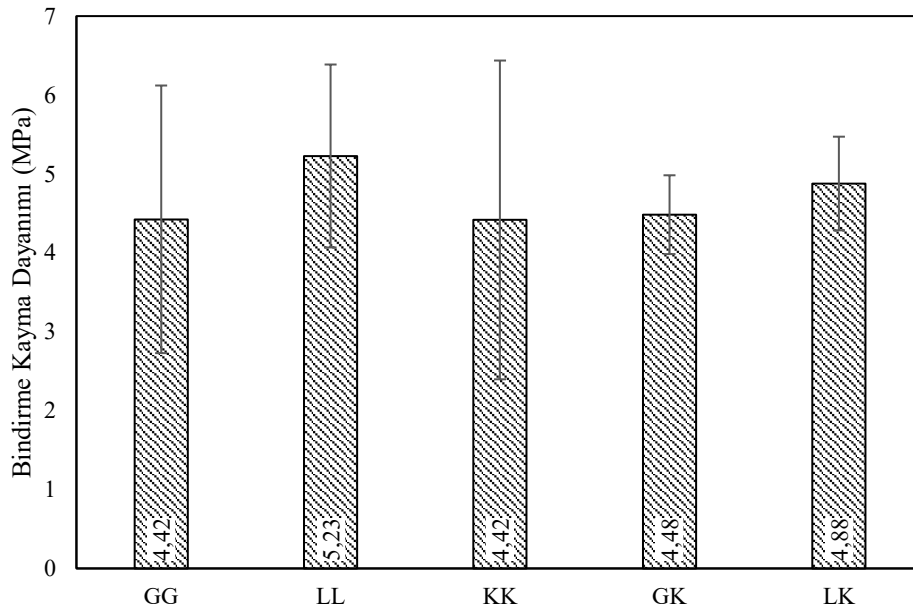
Şekil 4.22’de farklı odun türlerinin PU esaslı yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesi sonucu elde edilen örneklerin bindirme kayma dayanımı değerleri sunulmaktadır. Ladin–ladın (LL) birleşimi, yaklaşık 5,23 MPa ortalama değeriyle en yüksek bindirme kayma dayanımını göstermiştir. Bu durum, ladin odununun orta yoğunluklu yapısı, lif yönelimiyle uyumlu yüzey morfolojisi ve PU tutkalının bu yüzeye etkin şekilde nüfuz edebilmesiyle açıklanabilir. Aynı tür birleşimi olması sayesinde, yapışma arayüzeyinde oluşabilecek elastikiyet veya lif yönü uyumsuzlukları da minimize edilmiştir.

Kavak–kavak (KK) ve göknar–göknar (GG) örneklerinde ise ortalama dayanım değerleri sırasıyla 4,71 MPa ve 4,64 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu değerlerin ladin örneklerine kıyasla düşük olması, özellikle kavak odununun düşük yoğunluğu ve gözenekli yapısı nedeniyle PU tutkalı ile arayüzeyde yeterli kohezyon oluşmasının zorlaşması ile ilişkilendirilebilir.

Farklı tür kombinasyonlarından elde edilen göknar–kavak (GK) ve ladin–kavak (LK) örneklerinde elde edilen ortalama bindirme kayma dayanımı değerleri sırasıyla 4,48 MPa ve 4,88 MPa düzeyindedir. Bu değerler, aynı tür birleşimlerine göre benzer ya da biraz daha düşük seviyelerdedir. Özellikle farklı yoğunluk ve lif yönlenmesi gösteren

türlerin arayüzeyinde yapıştırıcı stresinin eşit dağılmaması, yerel gerilme konsantrasyonlarına yol açarak dayanımı sınırlandırmaktadır.

Genel olarak, PU yapıştırıcısı ile yapılan aynı tür birleşimlerde daha yüksek kayma dayanımı elde edilirken, farklı türler arasında oluşan doku ve lif uyumsuzlukları bu performansı sınırlamaktadır. Bu sonuç, özellikle yük taşıyan ahşap birleştirme uygulamalarında tür uyumluluğunun önemli bir parametre olduğunu ve PU esaslı tutkalların homojen yüzeylerde daha başarılı performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.22: Odun türlerinin bindirme kayma dayanımı

Çizelge 4.27'e göre aynı ve farklı odun türüne sahip malzemelerin bindirme kayma dayanımı değerleri (p -değeri $> 0,05$) arasında bir farklılık olduğunu gösteren yeterli kanıt bulunamamaktadır.

Çizelge 4.27: Aynı ve farklı odun türüne sahip malzemelerin bindirme kayma dayanımı değerleri için tek-yönlü varyans analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-değeri
Gruplararası	2,560	4	0,640	0,360	0,834
Gruplariçi	35,599	20	1,780		
Toplam	38,159	24			

Çizelge 4.28'de aynı ve farklı odun türüne sahip malzemelerin bindirme kayma dayanımı değerleri için Tukey ortalama karşılaştırma analizi verilmiştir. Aynı harf değerine sahip olan örnek grupları arasında istatistiksel olarak birbirinden farklı değildir.

Çizelge 4.28: Aynı ve farklı odun türüne sahip malzemelerin bindirme kayma dayanımı değerleri için Tukey ortalama karşılaştırma analizi

Odun Türü	N	Gruplama
KK	5	A
GG	5	A
GK	5	A
LK	5	A
LL	5	A

4.8 Hafiflik

Şekil 4.23'te, 18 mm ve 20 mm dış katman kalınlıklarında üretilmiş farklı ÇLK konfigürasyonlarının hafiflik değeri ($\text{MPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$), yani birim kütle başına düşen eğilme dayanımı, grafiksel olarak sunulmuştur. Bu metrik, özellikle yapısal uygulamalarda mekanik performans ile malzeme verimliliği arasındaki dengeyi değerlendirmek açısından önem taşımaktadır.

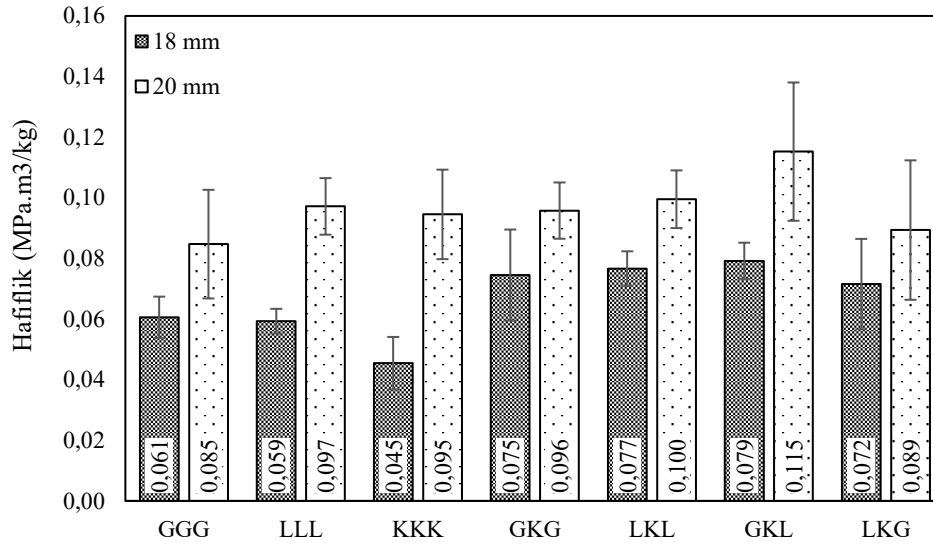
Genel olarak, tüm örneklerde 20 mm kalınlığındaki ÇLK'lar, 18 mm'lik karşılıklarına göre daha yüksek hafiflik değerleri sergilemiştir. Bu artışın temel nedeni, 20 mm panellerin daha yüksek eğilme dayanımına sahip olması ve buna rağmen özgül kütlede sınırlı artış gözlemlenmesidir.

Hibrit örnekler incelendiğinde, GKL örneği, 20 mm kalınlığında yaklaşık $0,115 \text{ MPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ ile en yüksek hafiflik değerine ulaşmıştır. Bu durum hem göknarın düşük yoğunluğu hem de ladinin yüksek eğilme dayanımıyla ilişkilendirilerek açıklanabilir. Benzer şekilde, LKG örneği de yüksek hafiflik performansı göstermiştir. Bu sonuçlar, heterojen katman diziliminin, özellikle dış katmanlarda yüksek mukavemetli türlerin tercih edilmesi durumunda, malzemenin hafifliğini artırdığını ortaya koymaktadır.

Kontrol grubu olarak değerlendirilen homojen ÇLK örnekleri arasında, LLL örneği, yaklaşık $0,097 \text{ MPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ değeri ile öne çıkmıştır. Bu, ladin odununun orta yoğunluk ve iyi eğilme direnci kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. GGG ve KKK örnekleri ise daha düşük eğilme dayanımı ve daha yüksek ya da daha düşük yoğunluk nedeniyle daha düşük hafiflik değerleri sergilemiştir.

Özetle, hibrit ÇLK malzemeler, belirli tür kombinasyonlarıyla hafiflik performansı açısından homojen ÇLK'lara kıyasla üstünlük sağlayabilmektedir. Bu bağlamda, özellikle yük taşıma kapasitesi ve malzeme tasarrufu arasında optimizasyon gerektiren uygulamalarda hibrit tasarımların öncelikli tercih edilebileceği söylenebilir. Ayrıca,

dış katmanlara yüksek mukavemetli ve iç katmana düşük yoğunluklu odun türlerinin yerleştirilmesi, hafifliği maksimize etme açısından stratejik bir yaklaşımdır.



Şekil 4.23: ÇLK malzemelerin hafifliği

4.9 Tahribatsız Muayene

18-18-18 mm katman kalınlığına sahip üç katmanlı ÇLK örneklerinde eğilme testiyle belirlenen statik elastikiyet modülü ile tahribatsız muayene yöntemiyle elde edilen dinamik elastikiyet modülü (DEM) değerleri arasındaki farklar sistematik olarak değerlendirilmiştir. Dinamik ölçümler beş farklı noktadan gerçekleştirilmiş olup, ölçüm noktaları arasındaki varyasyon da detaylı biçimde analiz edilmiştir (Çizelge 4.29).

Genel olarak, tüm örnek gruplarında dinamik elastikiyet modülü, statik elastikiyet modülüne kıyasla daha düşük bulunmuştur. Örneğin, G-G-G örnek grubunda statik modül 6634,10 MPa olarak ölçülmüş, buna karşın beş noktadan elde edilen dinamik modül değerleri 2924,30–3159,04 MPa arasında değişmiştir. G-G-G grubunda ölçüm noktaları arasındaki farklar göreceli olarak daha dar bir aralıkta kalmış (%4,9 varyasyon), bu da homojen katman yapısının ölçüm tutarlılığını artırdığını göstermektedir. L-L-L grubunda benzer şekilde ölçüm noktaları arasında %11,9'a kadar fark gözlemlenmiş, bu da ladin odunundaki doğal varyasyonlara rağmen katmanlar arası malzeme bütünlüğünün korunabildiğini göstermektedir. Buna karşılık, K-K-K grubunda, ölçüm noktaları arasında %22,3'e varan farklar tespit edilmiştir. Bu

durum, kavak odununun düşük yoğunluk ve lif dağılımındaki düzensizlikten kaynaklanan akustik yansıma dengesizlikleri ile açıklanabilir.

Hibrit örnek gruplarında ise ölçüm noktaları arasında daha büyük farklar oluşmuştur. Özellikle L-K-L örnek grubunda, birinci ve üçüncü ölçüm noktaları arasındaki fark %72,2'ye ulaşmış; G-K-L grubunda ise bu fark %78,2 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, hibrit yapıda kullanılan farklı odun türleri arasındaki mekanik uyumsuzluk ve geçiş bölgelerinin dalga yayılımını olumsuz etkilemesiyle ilişkilidir. Ayrıca G-K-G ve L-K-G gibi gruplarda göknar ve ladin gibi reçineli türlerin varlığı da DEM değerlerinde ölçüm noktasına bağlı belirsizlik oluşturmuş olabilir.

Ölçüm noktaları arası bu farklılıklar, sadece katman türüne değil, aynı zamanda tahribatsız muayene tekniğinin ölçüm yönüne duyarlılığı ve test örneklerindeki fiber yönlenmesi ve yapısal boşlukların dağılımına da bağlanabilir. Bu bulgular, dinamik modül ölçümlerinin özellikle hibrit ÇLK'larda noktasal doğruluk yerine eğilim analizinde kullanılması gerektiğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, tahribatsız yöntemle elde edilen dinamik elastikiyet modülü ölçümleri, özellikle homojen yapıları ÇLK'larda statik değerlerle daha uyumlu olurken, hibrit yapılarda ölçüm noktalarına duyarlılığı yüksek bir karakter göstermektedir. Bu nedenle hibrit yapıların mekanik karakterizasyonunda tahribatsız muayene yöntemlerinin dikkatli yorumlanması, tercihen birden fazla ölçüm noktası üzerinden ortalama alınarak değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, bu farkların nedenlerini ortaya koymak üzere ileri düzey mikroyapı analizlerine ve dalga yayılım modellerine dayalı araştırmaların yapılması önem arz etmektedir.

Çizelge 4.29: 18-18-18 mm katman kalınlığına sahip ÇLK'lar için elastikiyet modülü ile dinamik elastikiyet modülü karşılaştırması

Örnek Grubu	Elastikiyet Modülü	Dinamik Elastikiyet modülü				
		1	2	3	4	5
G-G-G	6634110	6558,81	2924,30	2802,49	3159,04	1810,27
	Fark	1,13%	55,92%	57,76%	52,38%	72,71%
L-L-L	7585,82	7423,38	2581,30	7702,30	4537,75	2290,41
	Fark	2,14%	65,97%	-1,54%	40,18%	69,81%
K-K-K	6303,00	5855,06	4342,39	6315,53	4356,42	1767,29
	Fark	7,11%	31,11%	-0,20%	30,88%	71,96%
G-K-G	6465,84	5086,57	1747,55	5067,46	2361,12	1343,39
	Fark	21,33%	72,97%	21,63%	63,48%	79,22%

Çizelge 4.30 (devamı): 18-18-18 mm katman kalınlığına sahip ÇLK'lar için elastikiyet modülü ile dinamik elastikiyet modülü karşılaştırması

Örnek Grubu	Elastikiyet Modülü	Dinamik Elastikiyet modülü				
		1	2	3	4	5
L-K-L	9223,24	7128,27	2619,15	7253,00	5856,97	1905,14
	Fark	22,71%	71,60%	21,36%	36,50%	79,34%
G-K-L	9689,87	6478,89	2108,80	5089,80	3847,76	1869,41
	Fark	33,14%	78,24%	47,47%	60,29%	80,71%
L-K-G	7900,59	5902,06	3396,59	6157,07	3447,45	1750,09
	Fark	25,30%	57,01%	22,07%	56,36%	77,85%

20-14-20 mm katman kalınlığına sahip üç katmanlı ÇLK örneklerinde eğilme testlerinden elde edilen statik elastikiyet modülü ile tahribatsız muayene yöntemleri aracılığıyla beş farklı noktadan belirlenen dinamik elastikiyet modülü değerleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.30). Elde edilen bulgular, statik ve dinamik elastikiyet modülleri arasındaki sapmanın örnek grubuna ve ölçüm noktasına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur.

G-G-G örnek grubunda statik elastikiyet modülü 7010,32 MPa olarak ölçülmüş olup, dinamik modül değerleri 1213,02 MPa ile 4835,79 MPa arasında değişmiş, ölçüm noktaları arasındaki fark %78,21'e kadar çıkmıştır. Bu durum, homojen göknar odunu katmanlarından oluşmasına rağmen, ölçüm noktaları arasındaki varyasyonun yüksek olduğunu ve dalga yayılımının lokal farklılıklardan etkilenebileceğini göstermektedir.

L-L-L örnek grubunda statik modül 8436,32 MPa olarak belirlenmiş, dinamik modül değerleri ise 2725,4–3755,81 MPa arasında değişmiştir. Bu grupta ölçüm noktaları arasındaki maksimum fark %32,79 olup, bu oran diğer örneklerle göre daha düşüktür. Ladin odununun lif yönelimi ve dokusal homojenliği, ölçüm istikrarını artırarak tahribatsız muayene ile elde edilen değerlerin daha tutarlı olmasını sağlamıştır.

K-K-K örnek grubunda ise DEM değerleri 4315,94 MPa (nokta 1) ile 4857,34 MPa (nokta 5) arasında kalmış, fark %12,77 olarak ölçülmüştür. Bu grup, genel olarak düşük sapma göstermiştir; ancak %50'nin üzerinde ölçülen fark oranı, kavak odununun yapısal düzensizlikleri ve lif sürekliliğindeki zayıflıkların etkisiyle ilişkilendirilmiştir.

Hibrit örnek gruplarına bakıldığında, özellikle G-K-G ve L-K-G gruplarında statik ve dinamik modül değerleri arasındaki farklar daha yüksek oranlara ulaşmıştır. G-K-G grubunda fark %39,88'e kadar çıkarken, L-K-G grubunda %80,09'a kadar sapmalar

gözlemlenmiştir. Bu durum, farklı odun türlerinden oluşan katmanların geçiş bölgelerinde dalga yayılımının bozulması, rezonans frekanslarının farklılaşması ve heterojen yapının ölçüm güvenilirliğini azaltması ile açıklanabilir.

Özellikle L-K-L örnek grubunda birinci ölçüm noktasında dinamik modül değeri 1794,40 MPa iken, dördüncü noktada 5860,87 MPa olarak ölçülmüş ve bu iki nokta arasındaki fark %77,77 olmuştur. Bu, hibrit yapıların ölçüm noktası hassasiyetini ciddi biçimde etkileyen bir değişken olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, 20-14-20 mm katman kalınlığına sahip ÇLK'larda ölçüm noktası varyasyonları daha belirgin hale gelmiş ve özellikle hibrit yapılarda dinamik elastikiyet modülü değerleri büyük değişkenlik göstermiştir. Bu bulgular, NDT yöntemlerinin özellikle karmaşık katmanlı ve türler arası geçişli yapılarda çok noktadan ölçümle ve ortalama yaklaşımla değerlendirilmesinin daha güvenilir sonuçlar sağlayacağını göstermektedir. Ayrıca, yapısal bütünlüğün değerlendirilmesinde sadece ortalama DEM değerleri değil, ölçüm noktaları arasındaki dağılımın da dikkate alınması önerilmektedir.

Çizelge 4.31: 20-14-20 mm katman kalınlığına sahip ÇLK'lar için elastikiyet modülü ile dinamik elastikiyet modülü karşılaştırması

Örnek Grubu	Elastikiyet Modülü	Dinamik Elastikiyet Modülü				
		1	2	3	4	5
G-G-G	7010,32	4909,30	1213,02	4835,79	2962,76	1547,1
	Fark	26,00%	81,72%	27,11%	55,34%	76,68%
L-L-L	8436,32	5656,31	2725,4	4586,6	3755,81	2257,44
	Fark	25,44%	64,07%	39,54%	50,49%	70,24%
K-K-K	7237,47	5840,51	4977,98	5164,76	4408,55	1359,36
	Fark	7,34%	21,02%	18,06%	30,06%	78,43%
G-K-G	6923,36	5479,36	4603,21	4157,22	3982,14	1695,76
	Fark	15,26%	28,81%	35,70%	38,41%	73,77%
L-K-L	7918,17	7626,73	4614,39	6385,05	3811,6	2044,97
	Fark	17,31%	49,97%	30,77%	58,67%	77,83%
G-K-L	8364,60	5710,18	2861,39	5808,35	4696,61	1378,38
	Fark	41,07%	70,47%	40,06%	51,53%	85,78%
L-K-G	8053,72	4300,92	5325,24	2347,38	2951,77	1573,28
	Fark	45,56%	32,60%	70,29%	62,64%	80,09%

4.10 Sonlu Elemanlar Analizi

ÇLK panellerin eğilme direnci hem deneysel hem de nümerik yöntemlerle belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.32). Ayrıca, ÇLK'ların sonlu elmanlar analizinde yük altındaki davranışları Şekil 4.24'de verilmiştir. İncelemeler 18-18-18 mm ve 20-14-20 mm katman kalınlığına sahip örnek grupları üzerinden yürütülmüştür. Bulgular, katman kalınlığı ve katman bileşiminin eğilme performansı ve nümerik simülasyonların doğruluğu üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir.

18-18-18 mm konfigürasyonunda, deneysel ve nümerik eğilme direnci arasındaki farklar genel olarak düşük seviyelerde kalmıştır. K-K-K örnek grubunda yalnızca %1,98'lük bir sapma gözlemlenmiş olup, bu değer nümerik analizlerin doğruluğunun yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, L-L-L ve G-G-G gruplarında fark oranları sırasıyla %3,25 ve %9,88 ile kabul edilebilir seviyelerde bulunmuştur. Ancak hibrit yapıya sahip gruplarda, özellikle L-K-L (%20,99), G-K-L (%22,65) ve G-K-G (%24,61) örneklerinde fark oranlarının daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, hibrit yapıların katmanlar arası uyum farklılıkları ve malzeme heterojenliğinden kaynaklanan gerilme dağılımındaki değişimlerin, nümerik modellemede sınırlı biçimde temsil edilmesinden ileri gelmiş olabilir.

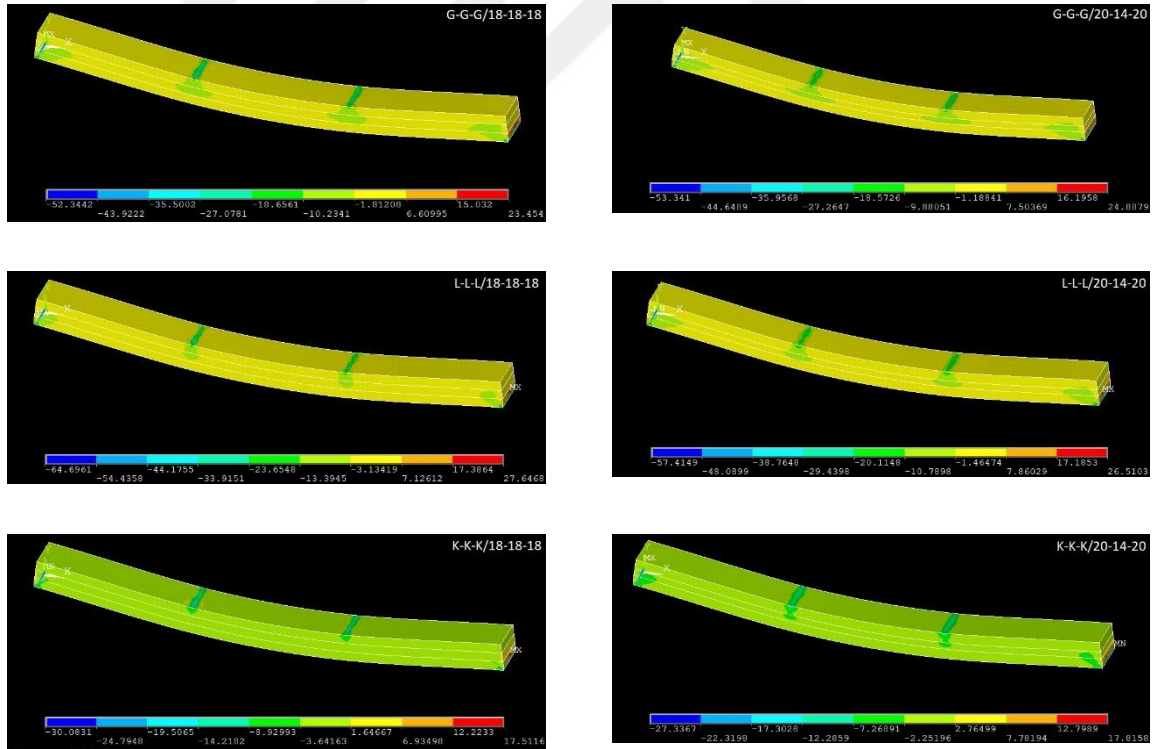
Buna karşın, 20-14-20 mm kalınlık konfigürasyonuna sahip örneklerde deneysel ve nümerik eğilme direnci arasındaki farkların belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Tüm örnek gruplarında fark %29'un üzerinde gerçekleşmiş; en yüksek fark oranı %46,40 ile K-K-K grubunda kaydedilmiştir. Bu fark, kalınlık asimetrisiyle birlikte gelen rijitlik dağılımındaki değişimlerin nümerik modeller tarafından tam olarak öngörülememesinden kaynaklanmış olabilir. L-K-L (%34,44), G-K-L (%42,84) ve L-K-G (%42,28) gruplarında da benzer şekilde yüksek sapmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca, deneysel olarak elde edilen değerlerin nümerik sonuçlara kıyasla sistematik olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, deneysel ortamda lif yönlenmeleri, doğal kusurlar ve bağlantı bölgesi etkilerinin gerçeğe daha yakın sonuçlar üretmesinden ileri gelmektedir.

Sonuç olarak, 18-18-18 mm kalınlık konfigürasyonunda nümerik modellemeler eğilme direncini oldukça isabetli tahmin edebilmekteyken, 20-14-20 mm konfigürasyonunda bu doğruluk önemli ölçüde azalmaktadır. Bu bulgular, farklı

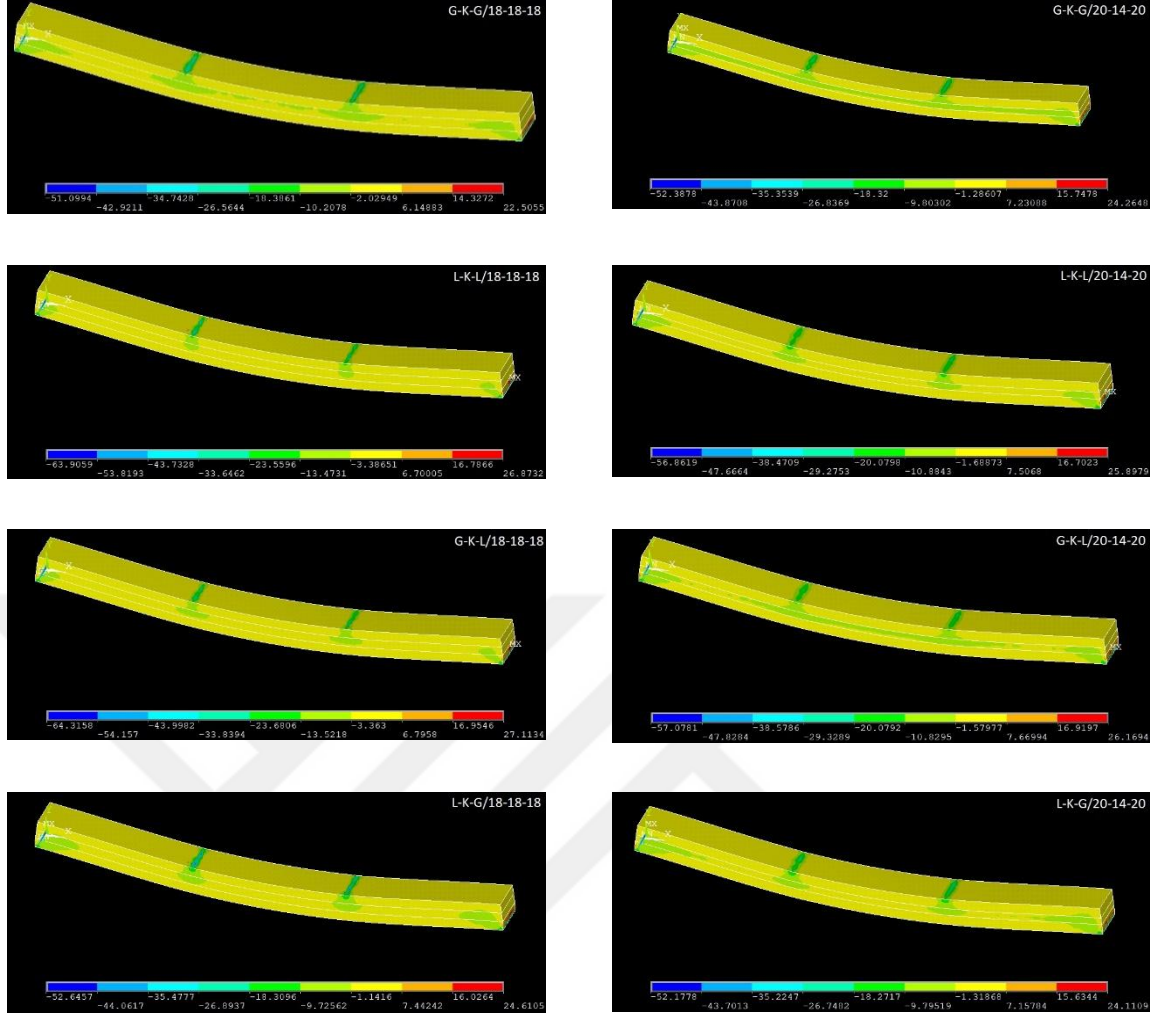
kalınlık ve malzeme konfigürasyonlarında nümerik analizlerin güvenilirliğinin artırılması için malzeme yönelimi, yapısal asimetri ve geçiş bölgelerinin daha ayrıntılı modellenmesi gerektiğine işaret etmektedir. Özellikle hibrit örneklerde karşılaşılan yüksek sapmalar, nümerik modellerde türler arası elastomekanik geçişlerin daha sofistike şekilde tanımlanmasını gerekli kılmaktadır.

Çizelge 4.32: Deneysel ve nümerik eğilme direnci karşılaştırması

Örnek Grubu	18-18-18 mm			20-14-20 mm		
	Deneysel	Nümerik	Fark	Deneysel	Nümerik	Fark
G-G-G	26,02	23,45	9,88%	35,83	24,88	30,56%
L-L-L	26,77	27,64	-3,25%	37,50	26,51	29,31%
K-K-K	17,17	17,51	-1,98%	33,23	17,81	46,40%
G-K-G	29,86	22,51	24,61%	38,40	24,26	36,82%
L-K-L	34,01	26,87	20,99%	39,49	25,89	34,44%
G-K-L	35,05	27,11	22,65%	45,78	26,17	42,84%
L-K-G	29,52	24,61	16,63%	35,60	24,11	32,28%



Şekil 4.24: Sonlu elemanlar analizi sonuçları



Şekil 4.25 (devamı): Sonlu elemanlar analizi sonuçları

4.11 Tartışma

Bu bölümde, çalışmadan elde edilen bulgular mevcut literatürle karşılaştırılarak değerlendirilmiş, araştırmanın sınırlılıkları ortaya konulmuş, hipotezlerin doğrulanma durumu incelenmiş ve çalışmanın akademik, yönetsel ve sosyal katkıları tartışılarak gelecekte yapılabilecek araştırmalara ilişkin öneriler sunulmuştur.

4.11.1 Çalışmanın Bulgularının Değerlendirilmesi

Bu araştırma, farklı odun türleri ve katman kalınlıkları kullanılarak üretilen hibrit Çapraz Lamine Kereste (ÇLK) panellerin mekanik özelliklerini ortaya koymuştur. Bulgular, kullanılan odun türlerinin ve katman kombinasyonlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastikiyet modülü ve liflere paralel çekme dayanımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle hibrit düzenlemelerin,

homojen panellere kıyasla rijitlik ve taşıma kapasitesinde anlamlı farklılıklar oluşturabileceği belirlenmiştir.

Sunulan bulgular, literatürde CLT'nin anizotropik yapısı, katman sayısı ve malzeme türüne göre değişen mekanik özellikleriyle ilgili genel eğilimlerle büyük ölçüde uyumludur. Özellikle ladin türünün eğilme direnci, elastikiyet modülü ve vida tutma kapasitesi bakımından yüksek performans göstermesi, Brandner ve diğ. (2016) ve Gavric ve diğ. (2015) gibi çalışmalarda bildirilen sonuçlarla paralellik göstermektedir. Öte yandan, bu tezde elde edilen bazı bulgular (örneğin kavak gibi düşük yoğunluklu türlerin belirli hibrit kombinasyonlarda avantaj sunabilmesi) literatürde yeterince yer almamış ve yeni bir katkı niteliğindedir. Bu durum, literatüre alternatif bakış açıları kazandırması açısından tez bulgularının özgünlüğünü ve önemini artırmaktadır.

4.11.2 Çalışmanın Sınırlılıkları

Bu tezde, CLT ve hibrit CLT panellerin farklı katman kalınlıkları ve ağaç türleri kullanılarak mekanik performanslarının deneysel ve nümerik yöntemlerle karşılaştırılması hedeflenmiştir. Ancak tartışma bölümünden hareketle, bazı önemli sınırlılıklar dikkat çekmektedir. Öncelikle, deneysel çalışmalar yalnızca belirli ağaç türleri (örneğin ladin, göknar, kavak) ile sınırlandırılmış olup, diğer endüstriyel türler veya ithal ağaçların değerlendirme dışı bırakılması genel geçerlik açısından kısıtlayıcıdır. İkinci olarak, kullanılan numune boyutları, laboratuvar ölçeğinde olup, gerçek yapı boyutları ve saha koşullarındaki davranış hakkında doğrudan bir genelleme yapılmasını sınırlamaktadır. Ayrıca, çalışmada kullanılan nümerik modelleme yaklaşımları doğrusal elastik varsayımlar içermekte olup, zamana bağlı viskoelastik davranışlar veya çevresel etkiler (nem, sıcaklık değişimi) kapsam dışı bırakılmıştır. Bu durum, CLT'nin uzun dönem davranışını yansıtmada sınırlayıcı bir faktör oluşturmaktadır.

4.11.3 Hipotezlerin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada geliştirilen temel hipotez, "farklı ağaç türlerinin ve katman kalınlıklarının, hibrit çapraz lamine kereste (ÇLK) panellerin mekanik özellikleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olduğu" yönündedir. Bu hipotez, hem deneysel hem de sayısal analizlerden elde edilen verilerle sistematik biçimde test edilmiştir.

İlk olarak, yapılan tek ve iki yönlü varyans analizleri (ANOVA) ve Tukey çoklu karşılaştırma testleri, hem odun türünün hem de katman kalınlığının eğilme direnci, elastikiyet modülü, kesme modülü, vida tutma kapasitesi ve basma dayanımı gibi parametreler üzerinde anlamlı farklılıklara yol açtığını göstermiştir. Özellikle ladin ve kavak gibi türlerin farklı katmanlarda kullanıldığı hibrit kombinasyonlar, bazı mekanik özelliklerde homojen panellere göre daha yüksek performans sergilemiştir. Bu durum, hipotezin doğruluğunu doğrudan desteklemektedir.

Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen nümerik analizler, özellikle homojen panellerde deneysel verilerle yüksek uyum göstermiş; hibrit panellerde ise malzeme heterojenliği ve yapısal asimetri nedeniyle daha karmaşık gerilme dağılımları ortaya koymuştur. Bu durum, yalnızca ağaç türü değil, aynı zamanda katman kalınlığının da yapısal performansa etkili şekilde yansıdığını ortaya koymaktadır. Aynı zamanda, tahribatsız muayene ile elde edilen dinamik elastikiyet modülü verilerinin statik ölçümlerle olan korelasyonu, homojen panellerde yüksek, hibrit panellerde ise daha düşük çıkmış; bu durum da katmanlar arası geçiş bölgelerinin yapısal bütünlüğe etkisini göstermiştir.

Sonuç olarak, hipotezin hem deneysel bulgular hem de sayısal modelleme verileriyle büyük ölçüde doğrulandığı söylenebilir. Ancak, farklı ağaç türlerinin nem içeriği, lif yapısı ve yoğunluk gibi doğal varyasyonları nedeniyle, bazı parametrelerde gözlemlenen varyasyonlar hipotezin sınırlı durumlarda esnek yorumlanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle hipotez, "tamamen doğrulanmıştır" yerine, "yüksek ölçüde desteklenmiştir" ifadesiyle akademik çerçevede değerlendirilmelidir.

4.11.4 Gelecek Araştırma Fırsatları

Tezin bulguları, birçok yeni araştırma yönü için temel teşkil etmektedir. İlk olarak, daha fazla ağaç türünün ve farklı katman konfigürasyonlarının (örneğin 5 veya 7 katlı CLT) dahil edilmesiyle genişletilmiş deneysel setler oluşturulabilir. Ayrıca, panel performansının nem oranı, bağıl nem, sıcaklık ve yaşlandırma gibi çevresel değişkenlere bağlı olarak zaman içindeki değişimi araştırılabilir. Yapay zeka destekli nümerik modelleme yaklaşımlarının (örneğin genetik algoritmalar veya makine öğrenmesi) kullanılması, CLT panellerin optimizasyonu açısından gelecek çalışmalar için değerli olacaktır. Bunun yanında, bağlantı sistemlerinin (vida, çivi,

tutkal türü vb.) CLT paneller üzerindeki etkileri de çok katmanlı bir araştırma potansiyeli sunmaktadır.

4.11.5 Tezin Akademik, Uygulamalı ve Yönetimsel Etkileri

Akademik açıdan bakıldığında, tez; CLT ve hibrit CLT panellerin katman kalınlığına ve ağaç türüne bağlı olarak gösterdiği mekanik tepkileri ilk kez bu denli sistematik ve karşılaştırmalı bir biçimde sunması açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Uygulamalı düzeyde, elde edilen bulgular, özellikle sürdürülebilir yapı uygulamalarında CLT kullanımının malzeme optimizasyonu ve maliyet-etkinlik açısından değerlendirilebilmesi için yol göstericidir. Yönetimsel açıdan ise bu çalışma, ulusal ve yerel inşaat standartlarının güncellenmesi ve yeni malzeme spesifikasyonlarının belirlenmesinde veri temelli karar süreçlerine katkıda bulunabilir. Ayrıca, yerli ağaç türlerinin kullanım potansiyelini göstermesi bakımından ormancılık politikaları ve ahşap endüstrisi stratejileri üzerinde de dolaylı etki yaratabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı odun türlerinden (gökmar, ladin, kavak) üretilmiş klasik ve hibrit ÇLK panellerin mekanik ve fiziksel özellikleri, katman kalınlığı değişkeni de dikkate alınarak kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular, hem malzeme bileşiminin (odun türü ve katman dizilimi) hem de yapısal konfigürasyonun (katman kalınlıkları) nihai performans üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermektedir.

- **Odun türünün etkisi-** Homojen örneklerde gözlemlenen veriler, ladin odununun gerek eğilme dayanımı gerekse elastikiyet modülü açısından en yüksek performansı sağladığını göstermiştir. Ladini gökmar ve kavak izlemiş; özellikle kavak odunundan üretilen örnekler, düşük yoğunluk ve elastikiyet modülü nedeniyle daha düşük mekanik direnç değerleri sergilemiştir. Bununla birlikte, kavak odununun düşük yoğunluğu, bazı uygulamalarda hafiflik avantajı sağlamaktadır. Bu bulgular, yapının ağırlığının kritik olduğu alanlarda kavak temelli hibrit konfigürasyonların dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.
- **Hibrit yapıların performansı-** Farklı odun türlerinin bir arada kullanıldığı hibrit paneller, bazı örneklerde homojen panellere kıyasla daha üstün performans göstermiştir. Özellikle dış katmanlarda yüksek mekanik özelliklere sahip türlerin (ladin, gökmar) kullanılması, yapının genel eğilme dayanımını artırmıştır. İç katmanda yer alan düşük yoğunluklu türler (örneğin kavak) ise hafifliği optimize etmiştir. Bu konfigürasyonlar, mühendislik açısından ağırlık-mukavemet dengesi bakımından ideal çözümler sunabilmektedir. Ancak hibrit yapılarda ölçüm noktaları arasında gözlenen değişkenlikler ve elastomekanik geçiş sorunları, yapısal homojenliğin dikkatle kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir.
- **Katman kalınlığının etkisi-** 18-18-18 mm ve 20-14-20 mm kalınlık konfigürasyonları karşılaştırıldığında, ikinci grubun bazı mekanik avantajlar sağladığı ancak aynı zamanda nümerik analizlerde daha yüksek sapma oranları oluşturduğu görülmüştür. Bu durum, orta katmanın inceltmesiyle oluşan

rijitlik geçişlerinin yapının yük taşıma davranışını karmaşıktırdığına işaret etmektedir. Özellikle hibrit panellerde bu tür asimetrik yapılar, mekanik gerilme dağılımını etkileyerek eğilme dayanımında sapmalara neden olmuştur. Bu bağlamda, katman kalınlıklarının dengeli seçimi, hem mekanik hem de hesaplamalı modelleme doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir.

- **Tahribatsız muayene (NDT) ve statik ölçüm karşılaştırması** - Çalışmada, elastikiyet modülünün tahribatsız yöntemlerle ölçümüne ilişkin önemli bulgular elde edilmiştir. Statik ve dinamik ölçüm yöntemleri arasındaki farklar, örneklerin türüne ve katman yapısına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Homojen ÇLK'larda bu farklar daha düşük seviyelerde kalırken, hibrit panellerde ölçüm noktaları arasında ciddi varyasyonlar gözlemlenmiştir. Bu durum, NDT yöntemlerinin hibrit yapılar üzerindeki hassasiyetinin sınırlı olabileceğini ve değerlendirmelerin çok noktadan ortalama alınarak yapılmasının uygun olacağını göstermektedir.
- **Nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması**- Nümerik analizlerle elde edilen eğilme direnci değerleri, 18-18-18 mm konfigürasyonlarında deneysel verilerle oldukça uyumlu çıkarken; 20-14-20 mm panellerde bu uyumun azaldığı görülmüştür. Hibrit yapıların rijitlik geçişleri ve türler arası mekanik farklılıkları, nümerik modellemelerin gerçeği yansıtmaya kapasitesini sınırlandırmaktadır. Bu durum, nümerik modellerde daha gelişmiş malzeme tanımlarına ve geçiş bölgelerinin daha ayrıntılı modellenmesine ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışma kapsamında elde edilen bulgular ışığında yapılan öneriler aşağıda listelenmiştir.

- **Malzeme seçimi:** Yapısal hafiflik gerektiren uygulamalarda kavak iç katmanlı, dış katmanları yüksek mukavemetli ladin ya da göknar ile oluşturulmuş hibrit ÇLK'lar tercih edilebilir.
- **Katman konfigürasyonu:** Katman kalınlıklarında dengesizlik yaratan konfigürasyonlar, özellikle hibrit yapılarda mekanik performans üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Katman kalınlıkları mümkün olduğunca dengeli dağıtılmalı veya bu durum FEM analizlerde doğru modellenmelidir.

- **Modelleme geliştirme:** ÇLK panellerin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesinde, ortotropik malzeme özelliklerinin dikkate alınması kritik öneme sahiptir. Literatürde önerildiği üzere elastisite modülü, basınç ve çekme dayanımı lif yönüne paralel, radyal ve teğet doğrultular için ayrı ayrı tanımlanmalı; özellikle dik doğrultudaki düşük rijitlik ve dayanım göz ardı edilmemelidir. Kesme modüllerinin de farklı düzlemler için ayrı atanması, kayma deformasyonlarının gerçekçi şekilde öngörülmesine olanak tanır. Ayrıca Poisson oranlarının yönlerle bağlı olarak değişken kabul edilmesi, panel davranışını daha doğru temsil etmektedir. Nem içeriğinin malzeme performansı üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulmalı ve modellenen paneller için genellikle %12 nem oranı referans alınmalıdır. Analizlerde doğruluk için yeterli ağ yoğunluğu (mesh density) sağlanmalı, bağlantı bölgelerinde ise yerel gerilme yığılmalarını yakalayacak daha ince mesh uygulanmalıdır. Böylelikle, CLT–beton hibrit kompozit sistemlerin rijitlik, taşıma kapasitesi ve deformasyon davranışları sayısal olarak güvenilir biçimde öngörülebilir.
- **Tahribatsız muayene:** Hibrit yapılarda dinamik elastikiyet modülünün güvenilir biçimde belirlenebilmesi için çok noktadan ölçüm yapılmalı ve ortalama değerlerle analiz gerçekleştirilmelidir. Ayrıca, tahribatsız muayene sonuçlarının statik testlerle kalibre edilmesi önerilir.
- **Gelecek çalışmalar:** Bu çalışmada kullanılan üç türle sınırlı kalınmayıp, farklı sertlik ve yoğunluk aralıklarına sahip türlerle yapılacak yeni çalışmalar, hibrit ÇLK sistemlerinin genel mekanik profilini ortaya koymada yararlı olacaktır.
- **Uygulama alanları:** Elde edilen bulgular, özellikle taşıyıcı olmayan hafif yapı elemanlarında, iç mekân panel sistemlerinde ve çevresel yüklerin düşük olduğu alanlarda hibrit ÇLK kullanımının ekonomik ve yapısal avantaj sağlayabileceğini göstermektedir. Uygulama alanları açısından bakıldığında, C24 sınıfı iğne yapraklı ahşap, Avrupa standartlarında yaygın olarak kullanılan ve Eurocode 5 kapsamında tanımlanan bir yapı malzemesidir. Ortalama yoğunluğu 350–420 kg/m³ aralığında olup, elastisite modülü yaklaşık 11.000 MPa'dır (EN 338, 2016). Basınç dayanımı 21–24 MPa seviyesinde olmakla birlikte, çekme ve eğilme dayanımları üst sınıf lamine kerestelere göre daha düşüktür. Bu özellikleri nedeniyle C24 malzeme, taşıyıcı sistemlerde

yüksek rijitlik gerektiren durumlarda sınırlı performans sunarken, özellikle hafiflik, ekonomik oluşu ve işlenebilirliği sayesinde taşıyıcı olmayan elemanlarda tercih edilmektedir. Literatürde vurgulandığı üzere, bölme duvarlar, kaplamalar, döşeme altı destekleri ve cephe alt konstrüksiyonları gibi yük taşımayan uygulamalarda C24 kullanımı hem maliyet etkinliği hem de işçilik kolaylığı sağlamaktadır (EN 338, 2016). Ayrıca, bu malzemenin düşük yoğunluğu sayesinde yapıya ek yük getirmemesi ve kolay temin edilebilmesi, pratikte yaygın kullanım nedenleri arasında sayılmaktadır.

Bu sonuçlar, ÇLK teknolojisinin çok yönlü yapılandırılabilirliğini ve farklı odun türlerinin fonksiyonel bir şekilde bir araya getirilerek yapısal verimliliğin artırılabilirliğini kanıtlamaktadır. Gelecek çalışmalarda, hem bu çalışma kapsamı dışındaki farklı odun türleri hem de çevresel etki açısından da hibrit ÇLK sistemlerinin performansını detaylı olarak incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- Abdoli, F., Rashidi, M., Rostampour-Haftkhani, A., Layeghi, M., Ebrahimi, G.** (2022). Withdrawal Performance of Nails and Screws in Cross-Laminated Timber (CLT) Made of Poplar (*Populus alba*) and Fir (*Abies alba*). *Polymers*, 14(15), 3129. <https://doi.org/10.3390/polym14153129>
- Ahmed, A. A. O., Garab, J., Horváth-Szováti, E., Kozelka, J., Bejő, L.** (2023). The bending properties of hybrid cross laminated timber (CLT) using various species combinations. *Materials*, 16(22), 7153. <https://doi.org/10.3390/ma16227153>
- Akter, S., Schweigler, M., Serrano, E., Bader, T.** (2021). A numerical study of the stiffness and strength of cross-laminated timber wall-to-floor connections under compression perpendicular to the grain. *Buildings*, 11(10), 442. <https://doi.org/10.3390/buildings11100442>
- Albostami, A., Wu, Z., Cunningham, L.** (2021). Elastic response of cross-laminated timber panels using finite element and analytical techniques. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48(10), 1245–1256. <https://doi.org/10.1139/cjce-2020-0205>
- Amin, Y., Adjı, R. P., Lubis, M. A. R., Nugroho, N., Bahtiar, E. T., Dwianto, W., Karlinasari, L.** (2023). Effect of Glue Spread on Bonding Strength, Delamination, and Wood Failure of Jabon Wood-Based Cross-Laminated Timber Using Cold-Setting Melamine-Based Adhesive. *Polymers*, 15(10), 2349. <https://doi.org/10.3390/polym15102349>
- Artun, H.** (2021). *Çapraz lamine ahşap (CLT) malzemenin bina enerji performansına etkisi: Trabzon ili örneği* [Yüksek lisans tezi, Avrasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. AXSIS. <https://hdl.handle.net/20.500.14429/4156>
- Aydin, T. Y., Ozveren, A.** (2019). Effects of moisture content on elastic constants of fir wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(1), 63–70. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1363-3>
- Aydın, M., Yılmaz Aydın, T.** (2025). *Auxeticity and Wood*. *Drvna industrija*, 76(1), 21–32. <https://doi.org/10.5552/drvind.2025.0219>
- Azambuja, R. da R., DeVallance, D. B., McNeel, J.** (2021). Evaluation of low-grade yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera*) as raw material for cross-laminated timber panel production. *Forest Products Journal*, 72(1), 1–10. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-21-00050>

- Baño, V., Godoy, D., Figueredo, D., Vega, A.** (2018). Characterization and Structural Performance in Bending of CLT Panels Made from Small-Diameter Logs of Loblolly/Slash Pine. *Materials*, 11(12), 2436. <https://doi.org/10.3390/ma11122436>
- Bathe, K. J.** (2014). *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe.
- Birinci, A. U., Öztürk, H., Demir, A.** (2021). Yerli ağaç türlerinden üretilen CLT duvarların yanal yük altındaki performansı. *Turkish Journal of Forestry*, 22(3), 318-322.
- Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., Thiel, A.** (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331–351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>
- Brandner, R.** (2014). Production and technology of cross laminated timber (CLT): A state-of-the-art report. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(2), 227–242. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0877-6>
- Brandner, R., Ringhofer, A., Sieder, R.** (2024). Out-of-plane bending properties of cross laminated timber (CLT). *Construction and Building Materials*, 438, Article 136991. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136991>
- Brandt, K., Wilson, A., Bender, D., Dolan, J. D., Wolcott, M. P.** (2019). Techno-economic analysis for manufacturing cross-laminated timber. *BioResources*, 14(4), 7790–7804.
- Brown, P.** (2018). *Conifer morphology and identification*. HarperCollins.
- Carter, J., Evans, R.** (2020). *Evergreens: Adaptations and survival*. Nature Publishing
- Christovasilis, I. P., Brunetti, M., Follesa, M., Nocetti, M., Vassallo, D.** (2016). Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories. *Construction and Building Materials*, 122, 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082>
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J.** (2007). *Concepts and applications of finite element analysis* (4th ed.). Wiley.
- Concu, G.** (2023). Feasibility of a Local Production Chain for Structural Timber in Sardinia, Italy. *Sustainability*, 15(20), 14815. <https://doi.org/10.3390/su152014815>
- Çavuş, V.** (2019). Mühendislik ürünü ağaç malzemelerde yükselen trend; çapraz tabakalanmış kereste. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 21(2), 560–569. <https://doi.org/10.24011/barofd.518169>
- Çavuş, Z., Kaya, M., Bülbül, R.** (2024). Çapraz lamine ahşap panellerin (CLT) ara katmanına uygulanan perforasyon işleminin levhaların ses yutma katsayısı değerlerine etkisinin incelenmesi. *Anadolu Orman*

- Das, S., Gařparík, M., Sethy, A. K., Niemz, P., Mahapatra, M., Lagaña, R., Langová, N., Kytka, T.** (2025). Comparative Analysis of Bending and Rolling Shear Performance of Poplar and Hybrid Maple–Poplar Cross-Laminated Timber (CLT). *Journal of Composites Science*, 9(3), 134. <https://doi.org/10.3390/jcs9030134>
- Dobeř, P., Lokaj, A., Vavruřová, K.** (2023). Stiffness and Deformation Analysis of Cross-Laminated Timber (CLT) Panels Made of Nordic Spruce Based on Experimental Testing, Analytical Calculation and Numerical Modeling. *Buildings*, 13(1), 200. <https://doi.org/10.3390/buildings13010200>
- European Committee for Standardization.** (2004). *Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings* (EN 1995-1-1). CEN.
- European Committee for Standardization.** (2021). *EN 16351:2015+A1:2021. Timber structures – Cross laminated timber – Requirements*. CEN.
- Forest Products Laboratory.** (2010). *Wood handbook: Wood as an engineering material* (Centennial ed., General Technical Report FPL–GTR–190). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf
- FPInnovations.** (2020). *CLT handbook – Cross-laminated timber. Vol. 1: Design and construction*. FPInnovations.
- Galih, N. M., Yang, S. M., Yu, S. M., Kang, S. G.** (2020). Study on the mechanical properties of tropical hybrid cross laminated timber using bamboo laminated board as core layer. *Journal of Korean Wood Science and Technology*, 48(2), 245–252. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2020.48.2.245>
- Güler, C., Ateş, S.** (2021). Odun malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine bir inceleme. *Orman Fakóltesi Dergisi*, 72(3), 1-15.
- Greenfield, L.** (2016). *Seed dispersal mechanisms in coniferous trees*. Academic Press
- Harte, A. M.** (2017). Mass timber – the emergence of a modern construction material. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 2(3), 121–132. <https://doi.org/10.1080/24705314.2017.1354156>
- He, M., Sun, X., Li, Z., Feng, W.** (2020). Bending, shear, and compressive properties of three- and five-layer cross-laminated timber fabricated with black spruce. *Journal of Wood Science*, 66, Article 38. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01886-z>
- Hıdır, A., Bal, B. C., Avşaroğlu, E.** (2024). Karaçam Odunundan Üretilen Çapraz Lamine Ahşabın Seçilmiş Mekanik Özellikleri Üzerine Rutubetin Etkisi. Kahramanmarař Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(2), 502-510. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1396980>

- Ilgın, H. E., Karjalainen, M.** (2024). Insights from Finnish experts on the construction practices and future prospects of cross-laminated timber (CLT). *Forests*, 15(1), 31. <https://doi.org/10.3390/f15010031>
- Jones, A., Miller, B.** (2015). *Resin and culture: The role of trees in ancient medicine*. Cambridge University Press.
- Kasal, A., Efe, H., Dizel, T.** (2010). Masif ve lamine edilmiş ağaç malzemelerde eğilme direnci ve elastikiyet modülünün belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 13(3), 183–190.
- Kaya, Y.** (2022). "Türkiye'de Sarıçam (*Pinus sylvestris*) Yayılışı ve Orman Ekosistemlerine Katkıları." *Botanik Dergisi*, 56(1), 45-52.
- Klippel, M., Frangi, A., Fontana, M.** (2011). Influence of the adhesive on the load-carrying capacity of glued laminated timber members in fire. *Fire Safety Science*, 10, 1219–1232. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.10-1219>
- Korkut, İ.** (2020). Ahşap Malzeme ve Mühendislik Ahşaplarının Sürdürülebilir Yapı Sektöründeki Rolü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kukk, V., Kalamees, T., Kers, J.** (2019). The effects of production technologies on the air permeability and crack development of cross-laminated timber. *Journal of Building Physics*, 43(3), 171–186. <https://doi.org/10.1177/1744259119866869>
- Kurul, F.** (2019). Türkiye’de Ahşap Yapı Endüstrisi. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 136.
- Li, M.** (2017). Evaluating rolling shear strength properties of cross-laminated timber by short-span bending tests and modified planar shear tests. *Journal of Wood Science*, 63(3), 331–337. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1631-6>
- Li, M., Zhang, S., Gong, Y., Tian, Z., Ren, H.** (2021). Gluing Techniques on Bond Performance and Mechanical Properties of Cross-Laminated Timber (CLT) Made from *Larix kaempferi*. *Polymers*, 13(5), 733. <https://doi.org/10.3390/polym13050733>
- MahdaviFar, V., Barbosa, A. R., Sinha, A., Muszynski, L., Gupta, R.** (2017). *Hysteretic behaviour of metal connectors for hybrid (high- and low-grade mixed species) cross laminated timber* [Conference paper]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.07825>
- Marković, N., Marjanović, M., Cvetković, R.** (2022). Design approach for cost-effective hybrid CLT floors. *Građevinar*, 74(4), 301–311. <https://doi.org/10.14256/JCE.3271.2021>
- Martínez-Martínez, J., Alonso-Martínez, M., Rabanal, F., Díaz, J.** (2018). Finite element analysis of composite laminated timber (CLT). *Proceedings*, 2(23), 1454. <https://doi.org/10.3390/proceedings2231454>

- Mendes, R. A. B., Benincá, M. E., Subhani, M., Acosta, A. P., de Avila Delucis, R., Désir, J. M., Morsch, I. B., Ilgin, H. E., Karjalainen, M.** (2024). Cross-Laminated Timber (CLT) in Compression Perpendicular to the Plane: Experimental Analysis on the Column below the Wall Load Configuration. *Buildings*, 14(3), 607. <https://doi.org/10.3390/buildings14030607>
- Miyazaki, J., Miyamoto, K., Tohmura, S., et al.** (2024). Gap-filling properties of adhesives used for cross-laminated timber. *European Journal of Wood and Wood Products*, 82, 123–134. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-01981-0>
- Mohd Yusof, N., Md Tahir, P., Lee, S. H., ve diğ.** (2019). Yapıştırıcı tiplerine bağlı olarak Akasya mangium ağacından yapılan çapraz lamine kerestenin mekanik ve fiziksel özellikleri. *Journal of Wood Science*, 65, Article 20. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1799-z>
- Hartog, D., Pieter, J.** (1949). *Mekanik titreşimler* (S. Palavan, Z. Demirgüç, Çev.). İstanbul : İstanbul Teknik Üniversitesi
- Mohd Yusof, N., Md Tahir, P., Lee, S. H., Sabaruddin, F. A., Suffian James, R. M., Khan, M. A., Lee, C. H., Muhammad Roseley, A. S.** (2021). Thermal properties of Acacia mangium cross laminated timber and its gluelines bonded with two structural adhesives. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 23(1). <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100402>
- Neve, O.** (2019). Modular CLT – Time to swallow the offsite pill. In *IABSE Congress: The Evolving Metropolis* (pp. 641–649). International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). <https://doi.org/10.2749/newyork.2019.0641>
- Niederwestberg, J., Zhou, J., Chui, Y.-H.** (2018). Mechanical properties of innovative, multi-layer composite laminated panels. *Buildings*, 8(10), 142. <https://doi.org/10.3390/buildings8100142>
- O’Ceallaigh, C., Sikora, K., Harte, A. M.** (2018). The Influence of Panel Lay-Up on the Characteristic Bending and Rolling Shear Strength of CLT. *Buildings*, 8(9), 114. <https://doi.org/10.3390/buildings8090114>
- Okuni, I. M., Bradford, T. E.** (2021). Modelling of Elevated Temperature Performance of Adhesives Used in Cross Laminated Timber: An Application of ANSYS Mechanical 2020 R1 Structural Analysis Software. *Environmental Sciences Proceedings*, 3(1), 46. <https://doi.org/10.3390/IECF2020-07902>
- Oran, B.** (2012). Hindistan Cevizi (Cocos nucifera L.) Odunu İle Üretilen Çapraz Yapıştırılmış Lamine Kerestelerin Bazı Teknolojik Özellikleri. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 107.
- Orman Genel Müdürlüğü (OGM).** (2020). Haftanın ağacı: Gökmar. <https://www.ogm.gov.tr/>

- Özen, Z. E.** (2017). *Isıl İşlem Görmüş Ahşap Malzemenin Çapraz Lamine Kereste Üretiminde Kullanım Olanakları*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi
- Rahman, M. T., Ashraf, M., Ghabraie, K., Subhani, M.** (2020). Assessment of shear analogy and Timoshenko method for analyzing hybrid CLT under out-of-plane loading. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 7(2), MAT-17. [https://doi.org/10.14455/ISEC.2020.7\(2\).MAT-17](https://doi.org/10.14455/ISEC.2020.7(2).MAT-17)
- Rajčić, V., Perković, N., Bedon, C., Barbalić, J., Žarnić, R.** (2020). Thermal and Energy-Efficiency Assessment of Hybrid CLT–glass Façade Elements. *Applied Sciences*, 10(9), 3071. <https://doi.org/10.3390/app10093071>
- Salonvaara, M., Desjarlais, A.** (2024). Impact of Insulation Strategies of Cross-Laminated Timber Assemblies on Energy Use, Peak Demand, and Carbon Emissions. *Buildings*, 14(4), 1089. <https://doi.org/10.3390/buildings14041089>
- Shahnewaz, M., Tannert, T., Popovski, M.** (2019). Lateral performance of cross-laminated timber shear walls: Analytical and numerical investigations. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*, 213–218. <https://doi.org/10.29173/mocs96>
- Silva, J. V. F., Oliveira, K. A. de, Oliveira, C. A. B., Silva, M. F. F., Molina, J. C.** (2023). Cross laminated timber bonding quality for different Brazilian species and pressing levels. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 26(2), 1–12. <https://doi.org/10.22320/S0718221X/2024.02>
- Sikora, K. S., McPolin, D. O., Harte, A. M.** (2016). Shear strength and durability testing of adhesive bonds in cross-laminated timber. *Journal of Adhesion*, 92(7–9), 758–777. <https://doi.org/10.1080/00218464.2015.1094391>
- Smith, J.** (2003). *Historical linguistics and the forest: An analysis of Slavic terms*. Oxford University Press
- Song, Y.-J., Hong, S.-I.** (2016). Evaluation of bonding strength of larch cross-laminated timber. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 44(4), 607–615. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2016.44.4.607>
- Swedish Wood.** (2019). *CLT handbook*. Swedish Wood. <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/clt-handbook-2019-eng-m-svensk-standard-2019-2022.pdf>
- Şanlı, E., Vural, N.** (2021). *Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Yapı Malzemesinin Strüktürel Açidan Değerlendirilmesi*. Yapı, (467), 50–57. <https://yapidergisi.com/capraz-lamine-ahsap-clt-yapi-malzemesinin-strukturel-acidan-degerlendirilmesi/>
- Tan, Y. F., Liew, K. C.** (2022). Morphological and bending properties of cross-laminated timber prototype manufactured with densified

Paraserianthes falcata. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1053, 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1053/1/012033>

- Tankut, N., Sözen, E.** (2014, Ekim). *Ülkemiz orman endüstrisinde mühendislik ürünü ağaç malzemeleri ve orman varlığına etkileri*. II. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu: Akdeniz Ormanlarının Geleceği – Sürdürülebilir Toplum ve Çevre (s. 795). Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi.
https://ormanweb.isparta.edu.tr/ormanvecevre/belgeler/bildiriler/80_S6-3.pdf
- Tsai, M.-T., Lin, W. T.** (2022). Efficiency of Energy Consumption between Reinforced Concrete Structure and Cross-Laminated Timber Based Hybrid Structure in East Asian Cities. *Energies*, 15(1), 165. <https://doi.org/10.3390/en15010165>
- Wang, Z., Zhou, J., Dong, W., Yao, Y., Gong, M.** (2018). Influence of technical characteristics on the rolling shear properties of cross laminated timber by modified planar shear tests. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 20(3), 469–478. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005031601>
- Wang, Y., Zhang, J., Mei, F., Liao, J., Li, W.** (2019). Experimental and numerical analysis on fire behaviour of loaded cross laminated timber panels. *Advances in Structural Engineering*, 22(1), 1–15. <https://doi.org/10.1177/1369433219864459>
- Wiesner, F., Thomson, D., Bisby, L.** (2020). The effect of adhesive type and ply number on the compressive strength retention of CLT at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 266(Part B), Article 121156. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121156>
- Wittel, F. K., Dill-Langer, G., Kroeplin, B.-H.** (2004). *Modeling of damage evolution in soft-wood perpendicular to grain by means of a discrete element approach* [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/0407162>
- Xie, W., Ding, Y., Wang, Z., Gao, Z., Zhang, T., Zhou, Y., He, Y., Huang, X.** (2020). Testing and analysis of hemlock cross laminated timber. *Wood Research*, 65(5), 819–832. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.5.819832>
- Yang, S., Li, H., Fei, B., Zhang, X., Wang, X.** (2022). Bond Quality and Durability of Cross-Laminated Flattened Bamboo and Timber (CLBT). *Forests*, 13(8), 1271. <https://doi.org/10.3390/f13081271>
- Yıldız, H.** (2018). Ahşap Malzemelerin Korunmasında Emprenye ve Yüzey İşlemlerinin Etkisi. *Ormancılık Dergisi*, 23(4), 198-206.
- Yılmaz, A., Koç, S.** (2019). Ahşap Malzemenin Çevresel Performans Analizi ve Sürdürülebilir Mimari. *Çevre Teknolojisi Dergisi*, 8(3), 150-160.

Yılmaz Aydın, T., Aydın, M. (2024). *Non-destructive evaluation of thermal treatment influence on elastic engineering parameters of poplar*. Drvna industrija, 75(4), 405–418. <https://doi.org/10.5552/drvind.2024.0180>

Yılmaz, T. (2010). *Türk mitolojisinde ağaç sembolleri*. Bilge Yayıncılık.

Yin, T., He, L., Huang, Q., Gong, Y., Wang, Z., Gong, M. (2024). Effect of lamination grade on bending and shear properties of CLT made from fast-growing Chinese fir. *Industrial Crops and Products*, 207(Part 1), 117741. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117741>

Yusof, N. M., Tahir, P. M., Lee, S. H., Khan, M. A., James, R. M. S. (2019). Mechanical and physical properties of cross-laminated timber made from *Acacia mangium* wood as function of adhesive types. *Journal of Wood Science*, 65, Article 20. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1799-z>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Halil KARATAY

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2022, Bursa Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Lisans** : 2024, Bursa Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2025, Bursa Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- **2022 Mart-2023 Haziran** : Saye Home Concept Ltd. Şti
- **2023 Eylül-2024 Mart** : Mobipan Orman Ürünleri A.Ş.
- **2024 Nisan-2024 Eylül** : İnegöl Orman İşletme Müdürlüğü
- **2024 Eylül-2025 Şubat** : Realdekor Ltd. Şti.

ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uysal, M., Eren, O., **Karatay, H.**, Memiş, D. (2022). Uludağ göknarı ve karaçam odunlarından elde edilen çapraz lamine kerestelerinin eğilme özelliklerinin incelenmesi. Turkish Journal of Forestry, 23(4), 313-319. <https://doi.org/10.18182/tjf.1166361>

Karatay, H., Akbaş, M. F., & Uysal, M. (2024). The diagonal tensile strength of corner joints constructed with different connectors. Turkish Journal of Forestry, 25(4), 473-482. <https://doi.org/10.18182/tjf.1511711>

Karatay, H., Güntekin, E., & Uysal, M. (2024). Çapraz lamine kerestelerin sonlu elemanlar metodu ile analizi. Ağaç Ve Orman, 5(1), 37-41. <https://doi.org/10.59751/agacorman.1465706>