

**GÜÇLENDİRİLMİŞ TABAKALI AHŞAP KOMPOZİT PANEL
OPTİMUM İŞLEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE
ÜRETİMİ**

SEYMEN ÇİFTÇİ

**DOKTORA TEZİ
KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. HASAN HÜSEYİN CİRİTCİOĞLU**

DÜZCE, 2024

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GÜÇLENDİRİLMİŞ TABAKALI AHŞAP KOMPOZİT PANEL
OPTİMUM İŞLEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE
ÜRETİMİ

Seymen ÇİFTÇİ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Nusret AS

İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa

Prof. Dr. Nurgül TANKUT

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Suat ALTUN

Karabük Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Serkan ÖZDEMİR

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 26/02/2024

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

26 Şubat 2024

Seymen ÇİFTÇİ

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU'na en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübeleriyle yapıcı eleştirilerde bulunan ayrıca çalışmalarında yol gösteren tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Nusret AS, Prof. Dr. Nurgül TANKUT ve Prof. Dr. Ümit BÜYÜKSARI'ya şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşime, çocuklarıma, beni hayata hazırlayan ve yetiştiren anneme, babama, kardeşlerime ve süreç içerisinde destek olan herkese sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yapılan çalışmalarda desteklerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Serkan ÖZDEMİR, Prof. Dr. Suat ALTUN, Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KORMAZ, Doç. A. Cemil İLÇE, Prof. Dr. Ali Etem GÜREL, Doç. Dr. Sezen SİVRİKAYA ÖZAK, Doç. Dr. Engin NAS, Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YILDIZ, Öğr. Gör. Hüseyin AYDIN, Düzce Meslek Yüksekokulu personellerine, malzeme tedariki ve üretimler konusunda her zaman destek veren Sancaklı Mobilya AŞ yönetici ve tüm personeline, Numerics Composites – Dr. Mert KILINÇEL'e, GENTAŞ Kimya – Murat AYTEKİN'e, Düzce Orman İşletme Müdürlüğü – Hasan GEDİKLİ'ye teşekkür ederim

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP- 2020.7.01.1089 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

26 Şubat 2024

Seymen ÇİFTÇİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
EXTENDED ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1. AHŞAP ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER	6
2.2. AHŞAP GÜÇLENDİRME AMACIYLA KULLANILAN MALZEMELER	10
2.2.1. Doğal Güçlendirme Elemanları	10
2.2.2. Metal Güçlendirme Elemanları	11
2.2.3. Polimer Güçlendirme Elemanları.....	11
2.3. YAPIŞTIRICILAR.....	15
2.3.1. Üre Formaldehit Tutkalı (ÜF)	17
2.3.2. Fenol Formaldehit Tutkalı (FF).....	17
2.3.3. Melamin Formaldehit Tutkalı (MF).....	18
2.3.4. Poliüretan Tutkal (PU)	18
2.3.5. Epoksi Reçine Esaslı Tutkal (EPX)	19
2.4. DENEY TASARIMI VE OPTİMİZASYON	20
2.4.1. Taguchi Deney Tasarımı.....	21
2.4.2. Regresyon Analizi.....	24
2.5. LİTERATÜR ÖZETİ	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM	28
3.1. MATERYAL	28
3.1.1. Ağaç Malzeme.....	29
3.1.1.1. Samsun kavağı (<i>Populus deltoides</i> I-77/51).....	29
3.1.1.2. Kayın (<i>Fagus orientalis</i> L.).....	30
3.1.1.3. Kaplamaların Hazırlanması	31
3.1.2. Güçlendirme Malzemesi	33
3.1.3. Tutkallar	34
3.1.3.1. Tutkal Türü ve Miktarının Belirlenmesi.....	35
3.2. YÖNTEM	50
3.2.1. Deney Tasarımı ve İstatistiksel Analiz	50
3.2.2. Üretim.....	52
3.2.3. Panel Yoğunluğunun Belirlenmesi	54
3.2.4. Eğilme Direnci ve Eğilmede Elastikiyet Modülü.....	55
3.2.5. Vida Çekme Direnci.....	57
3.2.6. Dinamik Eğilme Direnci	58

3.2.7. Yapışma Direnci	59
3.2.8. Detaylı Görüntüleme.....	61
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	63
4.1. FİZİKSEL ÖZELLİKLER.....	64
4.1.1. Yoğunluk Ölçümü	64
4.2. MEKANİK TEST SONUÇLARI	69
4.2.1. Tutkal Hattına Dik Eğilme Direnci ve Parametre Optimizasyonu	69
4.2.2. Eğilmede Elastikiyet Modülü ve Parametre Optimizasyonu	79
4.2.3. Vida Çekme Direnci ve Parametre Optimizasyonu	87
4.2.4. Dinamik Eğilme Direnci ve Parametre Optimizasyonu	95
4.2.5. Yapışma direnci ve Parametre Optimizasyonu.....	102
5. SONUÇ	113
6. ÖNERİLER.....	116
7. KAYNAKLAR.....	118
ÖZGEÇMİŞ	131

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Ahşap malzemenin bazı üstün özellikleri.	6
Şekil 2.2. Ahşap malzemenin bazı olumsuz özellikleri.	7
Şekil 2.3. Kompozit malzemelerin bazı avantaj ve dezavantajları.	8
Şekil 2.4. Bazı doğal lif örnekleri a) Muz, b) Keten c) Hindistan cevizi d) Abaca.	11
Şekil 2.5. CE üretim tipleri a) İplik, b) Kırpık elyaf, c) Keçe, d) Dokuma kumaş.	13
Şekil 2.6. Dokuma kumaş tipleri a) Plain (Düz), b) Twill (Kaz ayağı) c) Satin (Saten).	14
Şekil 2.7. Twill Elyaf dokuma kumaş a) Cam, b) Karbon; Plain dokuma kumaş c) Cam, d) Karbon.	14
Şekil 3.1. Kaplama üretim aşamaları.	33
Şekil 3.2. Twill dokuma (a) cam, (b) karbon elyaf.	34
Şekil 3.3. ÜF tutkalı ile üretilmiş ve delamine olmuş panel.	37
Şekil 3.4. Kontrol (a) ve GTAKP (b) katman kombinasyonu.	40
Şekil 3.5. a) Cam lamel üzerine, b) Cam/Karbon elyaf üzerine, c) Kavak kaplama üzerine tutkal uygulama ve fırında kurutma örnekleri.	45
Şekil 3.6. TGA/DTA cihazı (a), DSC cihazı (b).	46
Şekil 3.7. Damla açısı yüzey görünümü.	47
Şekil 3.8. Minitab programı Taguchi deney tasarımı seçim ekranı	51
Şekil 3.9. GTAKP Üretim süreci.	53
Şekil 3.10. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü test düzeneği	56
Şekil 3.11. Panel yüzeyinden vida çekme test düzeneği ve test yapılış düzeneği	57
Şekil 3.12. Çarpmaya karşı eğilme direnci deney düzeneği	59
Şekil 3.13. Yapışma direnci test numune ölçüleri ve test düzeneği.	60
Şekil 3.14. Mikrotom cihazı.	61
Şekil 3.15. Sputter Kaplama Cihazı (a) Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (b).	61
Şekil 3.16. Dino-Lite Universal dijital mikroskop.	62
Şekil 4.1. Yoğunluk için S/G oranları ana etki düzey grafiği.	67
Şekil 4.2. ED için S/G oranları ana etki düzey grafiği.	71
Şekil 4.3. 200g/m ² Tutkal ile üretilmiş Kayın (a1) EPX (b1) PU ve Kavak (a2) EPX (b2) örneklerde tutkal penetrasyonu.	74
Şekil 4.4. EEM için S/G oranları ana etki düzey grafiği.	82
Şekil 4.5. VD için S/G oranları ana etki düzey grafiği.	89
Şekil 4.6. Farklı gramajlarda tutkal penetrasyon oranları (sırasıyla 100-150-200 g/m ²) a)EPX b) PU.	91
Şekil 4.7. DED için S/G oranları ana etki düzey grafiği.	97
Şekil 4.8. DED testi kırılma görüntüleri Kavak (a), Kayın (b).	99
Şekil 4.9. YD için S/G oranları ana etki düzey grafiği.	104
Şekil 4.10. Yapışma test sonucu kopma görüntüsü (a) cam elyaf (b) karbon elyaf (c) cumba).	106
Şekil 4.11. YD test sonucu kopma görüntüsü (a) cam elyaf (b) karbon elyaf (yüzey)..	107
Şekil 4.12. GM kullanılan örneklerdeki tutkal penetrasyon görüntüsü.	108
Şekil 4.13. Epoksi tutkal termogravimetrik (TGA-DTA) analiz grafiği.	109
Şekil 4.14. Epoksi tutkal DSC analiz grafiği.	109

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1 Ahşap esaslı tabakalı kompozit malzemeler.....	10
Çizelge 3.1. Samsun kavağı fiziksel ve mekanik özellikleri.	30
Çizelge 3.2. Doğu Kayını (<i>Fagus orientalis</i> L.) fiziksel ve mekanik özellikleri	31
Çizelge 3.3. 10mm LVL üretimi için gerekli kaplama sayısı ve tutkal miktarları	32
Çizelge 3.4. Cam ve Karbon elyaf dokuma kumaş teknik özellikleri.	34
Çizelge 3.5. ÜF tutkalı ile yapılan ön deneme çalışması faktörler ve faktör seviyeleri	36
Çizelge 3.6. FF tutkalı ile yapılan deneme üretimi faktörleri.	38
Çizelge 3.7. FF Ön deneme için Taguchi metodu L_9 (3^4) deney tasarımı.	39
Çizelge 3.8. Üretimi gerçekleştirilen ve presin açılmasıyla delamine olan malzemeler.	40
Çizelge 3.9. Epoksi reçine esaslı yapıştırıcı teknik özellikleri.	44
Çizelge 3.10. Tek komponentli poliüretan esaslı tutkal teknik özellikleri.....	48
Çizelge 3.11. GTAKP üretiminde kullanılan faktörler ve faktör seviyeleri	49
Çizelge 3.12. Deney Faktörleri ve L_{36} ($2^2 \times 3^4$) Ortogonal Dizin	51
Çizelge 3.13. Örnek tutkal uygulama miktarı çizelgesi.....	53
Çizelge 4.1. Deney örnekleri yoğunluk değerleri.	65
Çizelge 4.2. Yoğunluk için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.....	66
Çizelge 4.3. Yoğunluk değerleri ANOVA sonuçları.....	68
Çizelge 4.4. ED aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.	69
Çizelge 4.5. ED için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.....	71
Çizelge 4.6. ED için ANOVA sonuçları.....	72
Çizelge 4.7 Ahşap esaslı bazı malzemelerin ED değerleri.	76
Çizelge 4.8. Optimum ED S/G oranını oluşturan faktör kombinasyonu.	79
Çizelge 4.9. EEM aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.	80
Çizelge 4.10. EEM için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.	81
Çizelge 4.11. EEM için ANOVA sonuçları.....	83
Çizelge 4.12. Ahşap esaslı bazı malzemelerin EEM değerleri.	84
Çizelge 4.13. Optimum EEM - S/G oranını oluşturan faktör kombinasyonu.....	86
Çizelge 4.14. VD aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.	87
Çizelge 4.15. VD için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.	89
Çizelge 4.16. VD için ANOVA sonuçları.	90
Çizelge 4.17. Bazı tabakalı ahşap kompozit panel ortalama VD değerleri.	92
Çizelge 4.18. Optimum VD performansını sağlayan üretim parametreleri.....	94
Çizelge 4.19. DED aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.....	95
Çizelge 4.20. DED için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.....	96
Çizelge 4.21. DED için ANOVA sonuçları.	97
Çizelge 4.22. Ahşap esaslı bazı malzemelerin DED değerleri.	100
Çizelge 4.23. Optimum DED performansını sağlayan üretim parametreleri.	101
Çizelge 4.24. YD aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.	102
Çizelge 4.25. YD için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.	103
Çizelge 4.26. YD için ANOVA sonuçları.	105
Çizelge 4.27. Bazı tabakalı ahşap kompozit panel ortalama YD değerleri	110
Çizelge 4.28. Optimum YD performansını sağlayan üretim parametreleri.....	112
Çizelge 5.1. Optimum ED, EEM, VD, DED ve YD S/G oranını oluşturan faktör kombinasyonu.	114

KISALTMALAR

A Ort.	Aritmetik Ortalama
AT	Ağaç Türü
BD	Liflere Paralel Basınç Direnci
CE	Cam Elyaf
CFR	Karbon Fiber Güçlendirme
CFRP	Karbon Fiber Güçlendirilmiş Plastik
CLT	Çapraz Lamine Kereste (ÇLK)
d	Yoğunluk
d	Density
DD	Doğrulama Deneyi
dk.	Dakika
ED	Eğilme Direnci
EEM	Eğilmede Elastikiyet Modülü
EM	Elastikiyet Modülü
EPX	Epoksi Yapıştırıcı
FF	Fenol Formaldehit
FRP	Fiber takviyeli plastik
GFC	Cam Elyaf Kompozit
GFRP	Cam Elyaf Takviyeli Polimer
GLULAM	Tutkallı Lamine Kereste
GM	Güçlendirme Malzemesi
GTAKP	Güçlendirilmiş Tabakalı Ahşap Kompozit Panel
IBS	Impact bending strength
KE	Karbon Elyaf
LSL	Tabakalanmış Şerit Kereste
LVL	Lamine Edilmiş Kaplama Kereste
MAM	Mühendislik Ürünü Ağaç Malzeme
Max.	Maksimum (En Fazla Değer)
MD	Makaslama Direnci
MF	Melamin Formaldehit

Min.	Minimum (En Az Değer)
MOE	Modulus of elasticity
MOR	Modulus of rupture
OGM	Orman Genel Müdürlüğü
OSB	Yönlendirilmiş Yonga Levha
OSL	Yönlendirilmiş Yonga Kereste
PB	Pres Basıncı
PS	Pres Süresi
PSC	Pres Sıcaklığı
PSL	Paralel Şerit Kereste
PU	Poliüretan
PVAc	Polivinil Asetat
S/G	Sinyal Gürültü Oranı
SCW	Screw pulling strenght
SN	Sıra Numarası
SS	Shear strength-Bonding quality
TKK	Tabakalı Kaplama Kereste
TAK	Tabakalanmış Kaplama Kereste
TAM	Tabakalı Ağaç Malzeme
TM	Tutkal Miktarı
TS	Türk Standartı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TS-EN	Türk Standartı (Avrupa ile Akredite)
TT	Tutkal Türü
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
ÜF	Üre Formaldehit
VD	Vida Çekme Direnci
YD	Yapışma Direnci

SİMGELER

MPa	Megapascal (Basınç Birimi)
mPa	Milipascal (Basınç Birimi)
p	%95 Güven Aralığı
\$	Amerikan Doları Para Birimi
$\bar{X}$	Aritmetik Ortalama
$\pm$	Aşağı Yukarı (Sınırlı Aralık)
$\varnothing$	Daire Çapı
'	Dakika
n	Deney Örnek Sayısı
	Derece
£	Euro Para Birimi
Δ	Fark
g	Gram
F	Kuvvet
$\perp$	Liflere Dik Yönde
//	Liflere Paralel Yönde
/	Matematiksel Bölme İşareti
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
N	Newton (Kuvvet Birimi)
°C	Santigrat Derece
s	Standart Sapma
®	Tescilli Marka
~	Yaklaşık
%	Yüzde
g/cm ³	Gram / Santimetreküp
dB	Desibel
kJ/m ²	Kilo joule / metrekare
kg/m ³	Kilo gram / Metreküp

ÖZET

GÜÇLENDİRİLMİŞ TABAKALI AHŞAP KOMPOZİT PANEL OPTİMUM İŞLEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE ÜRETİMİ

Seymen ÇİFTÇİ

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU

Şubat 2024, 130 sayfa

Gelişen teknolojiye bağlı olarak hızla değişen ihtiyaçlar nedeniyle malzemelerin mekanik etkilere karşı sınırlarını zorlayıcı koşullarda kullanılması gerekmekte ve bu nedenle yeni malzemelerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla yeni kompozit malzemelerin üretilmesi yanı sıra mevcut malzemelerin de ekstrem kullanım koşullarına (yük taşıma ve ani yük değişimleri) cevap verebilecek şekilde güçlendirilmesi son yılların güncel çalışma alanları arasında yer almaktadır. Bu çalışmada tabakalı ahşap esaslı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve ekstrem kullanım koşullarına cevap verebilir olmasını sağlamak amacıyla cam veya karbon elyaf dokuma kumaşlar kullanılarak güçlendirilmesi ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, yüksek katma değerli yeni bir ürün olarak Güçlendirilmiş Tabakalı Ahşap Kompozit Panel (GTAKP) üretimi yapmaktır. Bu üretim sürecinde, farklı yapısal özelliklere sahip ağaç malzeme ve güçlendirme için kullanılan polimer kompozitlerin bir araya getirilmesinde etkili olan koşulların belirlenmesi ve faktör parametrelerinin optimize edilmesi çalışmanın bir diğer amacıdır. Ayrıca yapılan üretimlerin seri üretim için kabul edilebilir üretim çevrim süresinde tamamlanmasını sağlamakta çalışmanın amaçları arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda literatürdeki LVL (Tabakalı Kaplama Kereste-TKK) üretim koşulları incelenmiş ve üretim sürecinde etkili olan faktörler ve faktör seviyelerini belirlemek amacıyla ön deneme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan ön çalışmalar sonucu GTAKP üretiminde etkili olan faktörler için kullanılabilecek olası faktör düzeyleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, 2 farklı ağaç türü-AT (Kavak-*Populus deltoides* I-77/51 ve Kayın-*Fagus orientalis* L.), 2 farklı tutkal türü-TT (Epoksi ve Poliüretan), 3 farklı tutkal miktarı-TM (100 150, 200 g/m²), 3 farklı pres süresi-PS (15, 20, 25 dk.), 3 farklı pres sıcaklığı-PSC (100, 120, 140 °C) ve 2 farklı güçlendirme malzemesi-GM (200 g/m² cam veya karbon elyaf dokuma kumaş) kullanılarak GTAKP üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen malzemelerin başarı kriteri olarak mekanik özellikleri (Eğilme Direnci-ED, Eğilmede Elastikiyet Modülü-EEM, Vida Çekme Direnci-VD, Dinamik Eğilme Direnci-DED ve Yapışma Direnci-YD) değerlendirilmiştir. Kullanılan kontrol faktörleri için optimum parametreler ve bu faktörlerin sonuç değerler (mekanik özellikler) üzerindeki katkı düzeylerinin belirlenmesi amacıyla Taguchi L₃₆ (2² x 3⁴) ortogonal deney tasarımı kullanılmıştır. Üretilen GTAKP'nin mekanik özelliklerindeki iyileşme oranları kontrol grubu örnekleri ile karşılaştırılarak belirlenmiştir. Bu karşılaştırma sonuçlarına göre CE veya KE ile güçlendirilmiş GTAKP malzemelerin ortalama değerleri eğilme direncinde %23,4; eğilmede elastikiyet modülünde %15,7; vida çekme direncinde %22; dinamik eğilme direncinde %32,2; yapışma direncinde ise %6,1 iyileşme sağlandığı görülmüştür. Çalışmada, kullanılan tutkal türlerinde pres sıcaklığı ve diğer üretim parametreleri etkisine bağlı olarak, GTAKP üretim çevrim sürecinde ise

%24 - 96 arasında deęiřen oranlarda zaman tasarrufu (6-24 saatten 15-25 dakikaya dūřurūlmesi) saęlandıęı belirlenmiřtir. Ayrıca dūřuk dayanım ۆzellikleri sebebiyle kısıtlı kullanım alanında tercih edilen Kavak ile GTAKP ۆretimi yapılarak, yۆksek dayanım ۆzelliklerine sahip ahřap esaslı gۆçlendirilmiř kompozit panel elde edilebileceęi ve çoęu mekanik etkiye karřın yۆksek dayanım saęlaması sebebiyle kullanılabilir olduęu dūřünۆlmektedir.

Anahtar Sۆzcۆkler: Cam/Karbon elyaf, LVL Gۆçlendirme, Mekanik ۆzellikler, Taguchi deney tasarımı.



ABSTRACT

PRODUCTION OF REINFORCED LAMINATED WOOD COMPOSITE PANEL AND DETERMINATION OF OPTIMUM PROCESS PARAMETERS

Seymen ÇİFTÇİ

Düzce University

Graduate Education Institute, Department of Composite Material Technologies

Doctoral Thesis

Supervisor: Associate Prof. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU

February 2024, 130 pages

Due to rapidly changing needs due to developing technology, materials need to be used in conditions that challenge their limits against mechanical effects, and therefore there is a need to develop new materials. For this purpose, the production of new composite materials as well as the strengthening of existing materials to meet extreme usage conditions are among the current areas of work in recent years. In this study, the strengthening of layered wood-based composite materials using glass or carbon fiber woven fabrics is discussed in order to improve the mechanical properties and ensure that they can respond to extreme (load bearing and sudden load changes) usage conditions. The main purpose of the study is to produce Reinforced Layered Wood Composite Panel (GTAKP) as a new product with high added value. In this production process, another aim of the study is to determine the conditions that are effective in combining wood materials with different structural properties and polymer composites used for reinforcement and to optimize the factor parameters. In addition, one of the aims of the study is to ensure that the production is completed within a reasonable cycle time for mass production. In this regard, LVL (Laminated Veneer Lumber-TKK) production conditions in the literature were examined and preliminary trial studies were carried out to determine the factors and factor levels effective in the production process. As a result of the preliminary studies, possible factor levels that can be used for the factors effective in GTAKP production were determined. Within the scope of the study, 2 different tree species - AT (*Populus-Populus deltoides I-77/51* and *Beech-Fagus orientalis L.*), 2 different glue types - TT (Epoxy and Polyurethane), 3 different glue amounts - TM (100, 150, 200 g/m²), 3 different press times - PS (15, 20, 25 min.), 3 different press temperatures - PSC (100, 120, 140 °C) and 2 different reinforcement materials - GM (200 g/m² glass GTAKP production was carried out using (e.g. carbon fiber woven fabric). Mechanical properties of the produced materials (Bending Strength - ED, Elasticity of Modulus - EEM, Screw withdrawal Resistance - VD, Impact Bending Resistance - DED and Adhesion Resistance - YD) were evaluated as success criteria. Taguchi L36 (22 x 34) orthogonal experimental design was used to determine the optimum parameters for the control factors used and the contribution levels of these factors on the outcome variables (mechanical properties). The improvement rates in the mechanical properties of the produced panels were determined by comparing them with the control group samples. As a result of this comparison, 23.4% in bending resistance; 15.7% in flexural modulus of elasticity; 22% in screw tensile strength; 33.1% in impact bending strength; It was observed that a 6.1% improvement was achieved in adhesion resistance. In the study, it was determined that depending on the effect of press temperature and other production parameters on the glue types used, time savings ranging from 24 to 96% (reducing from 6-24 hours to 15-25 minutes) were achieved in the GTAKP production cycle process. In

addition, it is thought that by producing GTAKP with poplar, which is preferred in limited usage areas due to its low strength properties, wood-based reinforced composite panels with high strength properties can be obtained and can be used for due to its high resistance against most mechanical effects.

Keywords: LVL Reinforcement, Glass / Carbon fiber, Taguchi experimental design, Mechanical properties.



EXTENDED ABSTRACT

PRODUCTION OF REINFORCED LAMINATED WOOD COMPOSITE PANEL AND DETERMINATION OF OPTIMUM PROCESS PARAMETERS

Seymen ÇİFTÇİ
Düzce University

Graduate Education Institute, Department of Composite Material Technologies
Doctoral Thesis

Supervisor: Associate Prof. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU

February 2024, 130 pages

1. INTRODUCTION

From past to present, wood or wood-based composite materials produced from wood, a renewable natural resource, have been used in construction, furniture, logistics, sports products, wooden toys, automotive, air and sea transportation and many other areas (Liu and Guan 2019; Monteiro et al. 2018; Das et al, 2021). The usage areas of wood-based products are increasing day by day because they are natural and healthy, affordable, easily accessible and processable (Çolak and Değirmenpe 2020). Due to rapidly changing needs due to developing technology in recent years, materials must be used under conditions that challenge their limits against environmental and mechanical effects. For this reason, there is a greater need to develop new composite materials that can meet the needs that arise in their places of use. Layered wood materials have an important place in the development of wood-based composite materials. Layered wood panels are wood-based composite materials obtained by gluing wood layers on each other parallel or perpendicular to the fibers using different production methods to create new products with high strength properties (Güller, 2001; Tankut and Sözen 2014). These materials are produced in order to use high value-added tree species more efficiently or to obtain high value-added products from low value-added tree species. In order to increase the strength of these panels against the loads they are exposed to, reinforcement materials are used in their production or afterwards. For the purpose of strengthening wood or wood-based composite materials from past to present; metals (steel, aluminum, etc.), natural fibers (bamboo, hemp, etc.) and artificial fibers (glass, carbon, etc.) are used (Bulleit, 1983; Borri et al., 2013; Song et al., 2018). The use of fiber-added polymers to strengthen structural elements has become an effective method both in terms of their structural performance and economically (Taheri et al. 2009). Wood and wood-based composite materials (plywood, LVL, sandwich panels, etc.) and their reinforced forms using

different materials are used in automotive (Liu and Guan 2019), aviation, marine vessels, furniture, construction (Monteiro et al. 2018), where lightness and strength are sought together (Monteiro et al. 2018).) and sports equipment (Negro, 2022). Expanding the usage areas of wood-based composite materials and producing new composite materials, as well as strengthening existing materials to respond to extreme usage conditions (load bearing and sudden load changes), are among the current areas of work in recent years. In this study, the strengthening of layered wood-based composite materials using glass or carbon fiber woven fabrics in order to improve their mechanical properties and ensure that they can respond to extreme usage conditions is discussed. The main purpose of the study is to produce Reinforced Layered Wood Composite Panel (GTAKP) as a new product with high added value. In this production process, another aim of the study is to determine the factors and optimum production parameters that are effective in combining wood materials with different structural properties and polymer composites used for reinforcement. In addition, ensuring that the production is completed within the acceptable cycle time for mass production is among the aims of the study. In this regard, the LVL (Laminated Veneer Lumber) production conditions in the literature were examined and preliminary trial studies were carried out to determine the factors and factor levels effective for the production of reinforced LVL (GTAKP) and the final trial pattern was created and test samples were produced.

2. MATERIAL AND METHODS

In order to determine the production factors that affect the mechanical properties of GTAKP, a literature review was first conducted and a preliminary trial study was conducted using wood materials, glues and reinforcement materials used in similar studies. As a result of the preliminary trial study, the production factors (wood type, glue type, glue amount, press cycle time, press temperature and reinforcement materials) that were found to be successful in terms of adhesion strenght for GTAKP production were decided. Peel veneers obtained from two different tree species, Samsun poplar (*Populus deltoides* I-77/51) and Oriental beech (*Fagus orientalis* L.), are preferred in GTAKP production because they grow widely in Turkey, are frequently used in the laminated board industry and are easily available. has been made. Within the scope of the study, two-component epoxy glue, which is currently used in wood bonding and composite material production, and can be fully cured in 12-24 hours at room temperature, and moisture-cured polyurethane glues, which can be fully cured in 6-12 hours at room temperature, were used. These glues were preferred in the preliminary test study because

they provide good adhesion between wood and reinforcement materials (Glass - Carbon fiber) in a short time (15-25 minutes) under hot press conditions and can be produced successfully.

As the factor and factor levels to be used for GTAKP to be produced within the scope of the study, 2 different tree species-AT (Poplar-*Populus deltoides* I-77/51 and beech-*Fagus orientalis* L.), 2 different glue types-TT (Epoxy-EPX and Polyurethane-PU).), 3 different glue amounts-TM (100, 150, 200 g/m²), 3 different press times-PS (15, 20, 25 min.), 3 different press temperatures-PSC (100, 120, 140 °C) and The experimental design was created by considering 2 different reinforcement materials-GM (200 g/m² glass-CE or carbon fiber-KE woven fabric) and a control group without reinforcement material. Some physical (density-d) and mechanical properties (modulus of rupture-MOR, modulus of elasticity-MOE, screw pulling strenght-SCW, impact bending strength-IBS, shear strength-bonding quality -SS) were determined to evaluate the produced GTAKP material as performance criteria. In case a full factorial experimental design is used according to the factors and factor levels taken into account, $324 \times 10 \times 6 = 19440$ test samples must be produced and tested in $2 \times 2 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 324$ different combinations and 10 repetitions for each performance criterion (10 of each sample will be tested). This process is quite laborious and costly. Taguchi orthogonal experimental design allows more than one factor to be taken into consideration at the same time and ensures that the optimum result is obtained by performing fewer experiments. Thus, the time and costs spent on trials can be reduced (Şirvancı, 1997). In addition, it is possible to determine the effect levels of factors on dependent variables with the Taguchi experimental design. In this way, it makes it possible to determine which of the factors is more effective or important on the result value desired to be improved. Due to these advantages, the Taguchi method was used to determine the factors effective in GTAKP production and optimum factor levels. Minitab® 18 statistical analysis package program was used to determine the appropriate orthogonal experimental design for the factors and factor levels considered and the L36 ($2^2 \times 3^4$) orthogonal experimental design was found to be appropriate. Thanks to this method, instead of 324 different trial productions, 36 different productions were made and the results were examined. 1.2 mm thick poplar and beech peeling veneers were used in the production of GTAKP test samples. These coatings were conditioned in the air-conditioning cabinet under $65 \pm 5\%$ relative moisture and $20 \pm 2^\circ\text{C}$ temperature conditions until they reached constant weight. Afterwards, GTAKP production was carried out using glue and reinforcement materials according to the conditions specified

in the L36 orthogonal experimental design.

In order to see the change in the physical properties of the produced materials, their density was measured as specified in the TS EN 323 standard. In addition, in order to measure the change in mechanical properties; modulus of rupture (ED) and modulus of elasticity (MOE) tests TS EN 310, Determination of screw pulling (SCW) strenght TS EN 13446, impact bending strenght (IBS) "Determination of bending strength against impact" TS ISO 13061-10 and bonding strenght (IB), experiments were carried out in accordance with TS 3969 EN 314-1 standards. Minitab® 18 statistical package program was used to evaluate the results obtained. Using the data obtained as a result of the experiments, signal-to-noise (S/N) ratios were calculated for each physical and mechanical property, thus revealing the optimum levels of the factors affecting GTACP production. In addition, variance analyzes were performed at 95% confidence level to determine the effect and effect levels of each factor on the mechanical properties of the material. Each result was checked whether it existed in the Taguchi experimental design by checking the optimum production parameters (factor levels) determined for the mechanical property. Material production was carried out and experiments were carried out to conduct verification experiments for factor level combinations that were not included in the experimental design. The success of the Taguchi method was checked by checking whether the verification test results were within the confidence interval calculated at the 95% confidence level. Regression equations were determined by performing regression analysis to reveal the contribution levels of each factor on mechanical properties (MOR,MOE,SCW,IBS,IB).

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In the density measurement for the purpose of examining physical properties, the second level of the AT factor (Beech), the second level of the TT factor (PU), the third level of the TM factor is 200 g/m², the first level of the PS factor (15 min.), the first level of the PSC factor (100 ° C) and the second level of the GM factor (carbon fiber woven fabric) were found to be optimum factor levels (optimal parameters) for material density. According to the analysis of variance (ANOVA) performed to control the importance of the difference between groups in terms of density, it was seen that the difference between groups was statistically significant ($p \leq 0.05$) for the factors of AT, TT, TM and GM. The impact levels of these factors on density are 61.6%, respectively; 1.68%; It was found to be 11.27% and 17.24%. It was determined that the difference between the groups for PS and PSC in terms of density was not statistically significant. The density of the samples

produced with beech was 20.65% higher than that of the samples produced with poplar, and the density of the samples glued with PU was 3.1% higher than the samples glued with EPX. The density of the samples produced with 200g/m² TM was measured to be approximately 10% higher than the samples produced with 100 g/m² TM.

When the mechanical properties of the produced GTAKP are examined, it is seen that the highest vertical modulus of elasticity (MOR) in the glue line is (218.22 N/mm²), 200 gr/m² epoxy glue, 100 °C press temperature, 15 min. press time, carbon fiber reinforcement material. and obtained from samples produced using beech veneers. The lowest MOR is (107.16 N/mm²), 100 gr/m² epoxy glue, 120 °C press temperature, 15 min. It was obtained from test samples produced from poplar samples without any reinforcement material (control) during the pressing period. Considering the factors used in production, the optimum factor levels are; Second level of AT factor (Beech), first level of TT factor (Epoxy), third level of TM factor 200 g/m², second and third levels of PS factor (20-25 min.), third level of PSC factor (140 °C) and GM It has been observed that the second level of the factor (KE woven fabric) creates the optimum production parameter combination. According to the variance analysis performed for MOR, the difference between the groups for the GM, AT and TT factors was found to be statistically significant ($p \leq 0.05$). It was observed that the impact levels of these factors on MOR were 35.25%, 30.78% and 6.96%, respectively. In terms of MOR, it was determined that the differences between the groups for TM, PS and PSC were not statistically significant. It was observed that ED of samples produced with beech was approximately 20% higher than samples produced with poplar. This situation is thought to be due to the increase in mechanical properties of the wood material in parallel with its density (Bodig ve Jayne, 1993; Missanjo and Matsumura, 2016; Bal and Bektaş, 2018). When the effects of TT on ED were evaluated, it was seen that epoxy-based glue had approximately 9% better MOR than polyurethane-based glue. It is thought that this result may be due to EPX penetrating the wood coating better than PU. Compared to the control group samples, MOR increased by 22% in the samples strengthened with CE and by 27% in the samples strengthened with KE. It can be said that KE makes a greater contribution to the mechanical properties of GTAKP materials produced as a result of its superior mechanical properties compared to CE.

Another mechanical property determined in the study is MOE. Highest MOE value (32146 N/mm²), 200 gr/m² EPX glue, 100 °C PSC, 15 min. obtained from samples produced using PS, KE reinforcement material and beech coatings. The lowest MOE

value is (20844.8 N/mm²), 100 gr/m² EPX, 120 °C PSC, 15 min. It was obtained from experimental samples produced from control (no reinforcement material) group poplar samples with PS. Considering the factors used in production, the optimum factor levels are; AT second level (Beech), TT second level (PU), TM third level (200 g/m²), PS first level (15 min.), PSC first level (100 °C) and GM second level (KE woven fabric).) is formed. As a result of the analysis of variance performed for MOE to determine the statistical significance of the difference between groups, it was seen that the difference between groups for AT and GM factors was statistically significant ($p \leq 0.05$). It is seen that the impact levels of these factors on MOE are GM with 54.33%, followed by the EC factor with 12.06%. In terms of MOE, it was determined that the differences between the groups for TT, TM, PS and PSC were not statistically significant. It was observed that the MOE of beech samples was approximately 8.4% higher than the samples produced with poplar. It is thought that the main reason for this difference in MOE in terms of AT is due to the density change in GTAKP. It was observed that the density of the samples produced with beech was on average 21% higher than that of poplar. When the MOE was evaluated in terms of GM, the MOE of the samples strengthened with CE was found to be 7.8% higher, and that of the samples strengthened with KE was found to be 23% higher than the control group samples.

Another mechanical property determined in the study was the determination of screw withdrawal strength (SCW). highest SCW (71.50 N/mm²), 200 gr/m² EPX glue, 100 °C PSC, 15 min. obtained from samples produced using PS, KE reinforcement material and beech coatings. The lowest SCW value (32.21 N/mm²) was obtained from the test samples produced from poplar samples with 150 gr/m² PU glue, 100 °C PSC, 25 min. PS and no reinforcement material. Considering the factors used in production, the optimum factor levels are; AT factor is the second level (Beech), TT is the first level (EPX), TM is the third level (200 g/m²), PS is the first level (15 min.), PSC is the third level (140 °C) and GM is the second level (KE). woven fabric). According to the variance analysis performed to control the significance of the difference between groups in terms of SCW, the difference between groups for AT, TT, TM and GM factors was found to be statistically significant ($p \leq 0.05$). The impact levels of these factors on SCW are 31.63%, respectively; 7.03%; It is seen that it is 8.98% and 27.90%. It was determined that the difference between the groups for PS and PSC in terms of SCW was not statistically significant.

It was observed that the screw tensile strength of the samples produced with beech was

approximately 22% better than the samples produced with poplar. When the effects of TT on SCW were examined, it was seen that samples produced with EPX produced 9.7% better SCW than samples produced with PU. The best SCW (54.7 N/mm^2) was obtained in the samples where 200 g/m^2 was applied for the TM factor, and this value was reduced to 150 g/m^2 (49.47 N/mm^2) and 100 g/m^2 (48.66 N/mm^2), respectively. As the amount of glue increases, the penetration depth and amount of glue into the wood material increases. It is thought that this situation increases the retention of the screw thread in the material and thus causes an increase in SCW. When the effects of GM on SCW were examined, from highest to lowest, KE (55.45 N/mm^2), CE (52.97 N/mm^2), and fiberless (control) group (44.45 N/mm^2) were produced, respectively. It was observed that it was obtained from the samples. SCWs of the samples produced using GM were found to be 25% higher in those using CE and 19.16% higher in those using KE, compared to the control group samples.

Another mechanical property evaluated in the study was impact bending strength (IBS). Highest IBS (37.55 kJ/m^2), 100 gr/m^2 PU glue, 140°C PSC, 15 min. Obtained from samples produced using PS, KE reinforcement material and poplar coatings. The lowest IBS is (28.28 kJ/m^2), 200 gr/m^2 EPX glue, 100°C PSC, 20 min. It was obtained from test samples produced from beech samples without PS reinforcement material. Considering the factors used in production, the optimum factor levels are; AT factor first level (Poplar), TT second level (PU), TM first level (100 g/m^2), PS first level (15 min.), PSC third level (140°C) and GM first level (CE woven fabric). According to the variance analysis performed to control the significance of the difference between groups in terms of IBS, the difference between groups for AT, TT and GM factors was found to be statistically significant ($p \leq 0.05$). The impact levels of these factors on IBS are 17.29%, respectively; It is seen that it is 16.96% and 32.27%.

In terms of IBS, it was determined that the differences between the groups for TM, PS and PSC were not statistically significant. When the effects of AT on IBS were evaluated, it was seen that the samples produced with Poplar were 19% higher than the samples produced with beech. When the effects of TT on IBS are examined, it is seen that the samples produced with PU are approximately 19% higher than those produced with EPX. It is thought that this is due to the increased brittleness of GTAKPs as a result of EPX glue being harder and brittle, as well as better penetration into the coatings. Compared to the control group samples, there was a 33.1% increase in the IBS of the samples produced with CE and a 31.4% increase in the samples produced with KE. As a result, it was

concluded that the use of GTAKP materials would be appropriate in areas where impact bending resistance is important and where sudden load changes and impact may be exposed (e.g. automobile floors, vehicle seats and bodies, etc.).

The last mechanical property considered in the study was shear strength-bonding quality (SS). Highest SS (6.23 N/mm^2) 200 gr/m^2 PU glue, 140°C PSC, 20 min. It was obtained from samples produced with beech using PS and CE reinforcement material. The lowest SS (4.08 N/mm^2) was obtained in materials produced from control group poplar samples with 100 gr/m^2 EPX glue, 140°C PSC, 25 min. PS. Considering the factors used in production, the optimum factor levels are; AT factor first level (Beech), TT second level (PU), TM second and third levels (150 - 200 g/m^2), PS second level (20 min.), PSC third level (140°C) and GM first level It consists of level (CE woven fabric). According to the variance analysis performed for SS, the difference between groups for AT, TT and GM factors was found to be statistically significant ($p \leq 0.05$). The impact levels of these factors on SS are 61.27%, respectively; It is seen that it is 21.17% and 5.16%.

In terms of SS, it was determined that the differences between the groups for TM, PS and PSC were not statistically significant. When the effect of AT on SS was evaluated, it was seen that GTAKP samples produced with beech had a higher SS compared to those produced with poplar. While the arithmetic average of the adhesion resistance of the samples produced with poplar is 4.86 N/mm^2 , it is seen that the arithmetic average of the adhesion resistance of the samples produced with beech is 5.44 N/mm^2 and 12% better adhesion is achieved. When the effect of TT on SS was examined, it was seen that the arithmetic mean of samples glued with EPX glue was 4.66 N/mm^2 , while the arithmetic mean of samples glued with PU glue was 5.64 N/mm^2 , and the arithmetic mean of samples glued with PU was 21% higher than EPX. Considering the SS values in terms of GM, the best adhesion resistance was produced by the samples produced using CE (5.27 N/mm^2), followed by the samples using KE (5.23 N/mm^2) and the control group (4.95 N/mm^2), respectively.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

Changes in the physical and mechanical properties of GTAKP were determined by comparing them with control group samples. According to these comparison results, 23.4% in ED from the mechanical properties of materials reinforced with CE or KE; 15.7% in MOE; 22% in SCW; 32.2% in IBS; It was observed that 6.4% improvement was achieved in SS. In the study, it was determined that time savings ranging from 24%

to 96% (reducing from 6-24 hours to 15-25 minutes) were achieved in the GTAKP production cycle time, depending on the effects of the glue types used, press temperature and other production parameters. In addition, it is thought that reinforced layered wood composite panel (GTAKP) with high strength properties can be produced with poplar, which has a limited usage area and is less preferred due to its low strength properties, thus providing a product that can be used for extreme loading conditions as well as obtaining a high added value product. It has been observed that there is a significant increase in the mechanical properties of the panels produced using different AT, TT, TM, PS, PSC and GM in GTAKP production. It was observed that PS and PSC factors did not have a statistically significant effect ($p \geq 0.05$) on the production of GTAKPs. In future studies, it is recommended to make productions using wider ranges for factor levels and evaluate the results in order to determine the possible effects of these factors. It would also be useful to investigate the fatigue and wear properties of these materials. In addition, production with different coating thicknesses should be taken into consideration in further studies to determine the effects of coating thicknesses on production and material properties.

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze, yenilenebilir bir doğal kaynak olan ağaç hammaddesinden elde edilerek üretilen ahşap veya ahşap esaslı kompozit malzemeler inşaat, mobilya, lojistik, spor ürünleri, ahşap oyuncak, otomotiv, hava ve deniz taşımacılığı ve benzeri birçok alanda kullanılmaktadır (Liu ve Guan 2019; Monteiro vd. 2018; Das vd., 2021). Ahşap esaslı ürünlerin, doğal ve sağlıklı olması, uygun maliyetli, kolay erişilebilir ve işlenebilir olması nedeniyle kullanım alanları her geçen gün artarak büyümektedir (Çolak ve Değirmentepe 2020).

Özartan ve Coşkun (2021) tarafından yapılan masif ahşap sektörü raporunda ahşap esaslı ürünlerin Türkiye ekonomisine katma değeri yaklaşık 1 milyar Euro iken, Avrupa Birliğinde (AB) 139 milyar Euro olduğu ve AB’de ahşap esaslı ürünlerin toplam sanayi üretiminin yaklaşık %7,1 kadarını oluşturduğu belirtilmektedir. Aynı çalışmada Türkiye’deki gayri safi yurt içi hâsılada oluşacak değişimler hesaplanarak gelecek 20 yıl içerisinde mevcut duruma göre ağaç hammaddesine dayalı son ürün ve ihracat cirosunun toplamı yaklaşık 63 milyar Euro, yarı mamul hacminin ise yaklaşık 27 milyar Euro’yu geçeceği tahmin edildiği bildirilmektedir (Özartan ve Coşkun, 2021).

Türkiye’de ve dünyada birçok yapraklı ve iğne yapraklı ağaç türleri ağırlıklı olarak yapı ve mobilya endüstrisinde kullanılmaktadır. Ülkemizde yetiştirilen yapraklı ağaç türlerinin başında kavak, kayın, meşe, dişbudak, çınar, okaliptüs, vb., iğne yapraklı ağaç türlerinde ise kızılçam, karaçam, göknar vb. ağaç türleri bulunmaktadır (Erkan, 2021). Orman Genel Müdürlüğü 2000-2021 yılları istatistikleri incelendiğinde, endüstrinin kullandığı odun miktarlarında artış olduğunu göstermektedir. Bu artış Kavak ağacında 25.550 m³’den 170.293 m³’e, Kayın ağacında ise 1.091.586 m³’den 4.258.782 m³’e çıktığı bildirilmiştir (Özartan ve Coşkun, 2021).

Kavak odunu, hızlı gelişen bir tür olarak 370 kg/m³ ortalama hacim yoğunluk değeri ile nispeten düşük yoğunluklu ağaçlar arasında yer almaktadır (Birler 2010). Odunun yoğunluğu ve mekanik özellikleri arasında sıkı bir ilişki bulunmaktadır (Kamala vd. 2014; Missanjo ve Matsumura, 2016). Bu nedenle kavak odunu mekanik özellikleri düşük yoğunluklu yumuşak ağaçların (ibreli türler) mekanik özelliklerine benzerlik

göstermektedir. Bu malzemeler genellikle kâğıt, MDF, kontrplak, LVL, yonga levha, meyve kasaları gibi ürünlerin imalatında sıklıkla tercih edilmektedir (Birler, 2010).

Orman Genel Müdürlüğü (OGM) 2021 yılı ormancılık istatistiklerine göre, Kayın ülkemiz ormanlarından endüstriyel kullanım için elde edilen yapraklı ağaç türleri içerisinde 4258782 m³ ile (yaklaşık %60) en yüksek üretim miktarına sahip olan ağaçtır (OGM, 2021). Türkiye'deki yayılış alanının geniş ve kolay temin edilebilir olmasının yanı sıra birçok ağaç türüne göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip olan Kayın yapı ve mobilya endüstrisinde tercih edilen türler arasında yer almaktadır. Ayrıca, masif ve bükme mobilya imalatı, spor aletleri, çeşitli alet sapları, parke, kontrplak, kaplama, lif-kâğıt üretimi, odun kömürü ve emprenye edildiğinde travers olarak kullanıldığı bilinmektedir (Doğu vd. 2001; As ve Büyüksarı 2010).

Dünyada ve ülkemizde ahşap ve ahşap esaslı malzemelerin kullanım alanlarının artmasına bağlı olarak artan tüketimin yanı sıra çağlar boyunca süren kontrolsüz kesimlerin yapılması, nüfus artışı ile orman alanlarına yerleşim yapılması ve yangın gibi doğal afetler, ormanların tahrip olmasına neden olmaktadır. Bu sebeplerle orman kaynaklarının daha efektif kullanılması için bazı çözümlerin ortaya konulmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu doğrultuda 19. yy başlarında kontrplak ile başlayan ahşap kompozit levha üretimini bu yüzyılın ortalarında yonga levha ve lif levha gibi diğer ahşap esaslı kompozit malzemeler takip etmiştir (Curling ve Kers, 2017; Stark vd., 2010).

Kompozit malzeme; yapısal olarak birbirinden farklı iki veya daha fazla bileşenden oluşan buna rağmen tek bir malzeme gibi davranan yeni malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Berthelot ve Ling 1999). Kompozit malzemelerin en önemli avantajı, malzemeyi oluşturan matris ve takviye elemanlar tek başlarına kullanıldıklarında arzu edilen mekanik özellikleri karşılayamamasına rağmen birbirleri ile etkileşim halinde kullanıldıklarında tek başlarına oluşturamayacakları üstün özellikleri ortaya çıkarabilmektedirler (Kalemtaş, 2014). Ahşap esaslı kompozit malzemeler, masif ahşapta varolan ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen unsurların dağıtılarak veya uzaklaştırılarak üretilen malzemelerdir. Bu sayede direnç özellikleri yüksek homojen malzemeler elde dilmektedir (Stark vd. 2010; Tankut ve Sözen 2014). Bu ürünlerin sağladığı avantajlardan bazıları; küçük ebatlı ağaçların kullanımının mümkün olması, atık odun parçalarının kullanılabilmesi, masif malzemede bulunan kusurların giderilerek kullanılması veya dağıtılması, şekil değişiminin azaltıldığı ürünlerin üretilmesi, masif malzemeye göre daha iyi özelliklerde ürün üretilebilmesi, değişik formlarda ürünler elde

edilebilmesidir (Berglund ve Rowell, 2005). Elde edilen bu malzemeler mühendislik ürünü ağaç malzeme (MAM) (Tankut ve Sözen 2014) olarak tanımlanmakta olup bazı yapısal tabakalı kompozit malzemeler LVL (Tabakalı Kaplama Kereste), PSL (Paralel Şerit Kereste), OSL (Yönlendirilmiş Yonga Kereste) şeklinde sınıflandırılmıştır (Stark vd. 2010). Bu malzemelerin geliştirilmesi günümüzde de devam etmektedir. LVL üretiminde genellikle düşük-orta yoğunluktaki yumuşak ağaç türleri kullanılmaktadır (Ozarska 1999; Bal ve Özyurt 2015).

Bu malzemeler katma değeri yüksek ağaç türlerinin daha verimli kullanılması ya da düşük katma değerli ağaç türlerinden yüksek katma değerli ürünler elde edilmesi amacıyla üretilmektedir. Üretilen bu panellerin maruz kaldıkları yüklere karşı dayanımını artırmak amacıyla üretimlerinde veya sonradan güçlendirilme malzemeleri kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze ahşap veya ahşap esaslı kompozit malzemelerin güçlendirilmesi amacıyla; metaller (çelik, alüminyum vb.), doğal lifler (bambu, kenevir vb.) ve suni elyaflar (cam, karbon vb.) kullanılmaktadır (Bulleit, 1983; Borri vd. 2013; Song vd. 2018). Yapısal elemanları güçlendirmek için fiber katkılı polimerlerin kullanımı, hem yapısal performansları (mekanik özellikleri) hem de ekonomik özellikleri açısından taşıdıkları üstünlükler nedeniyle özellikle son yıllarda etkili bir yöntem olmuştur (Taheri vd. 2009). Ahşap ve ahşap esaslı kompozit malzemeler (kontrplak, LVL, sandviç paneller vb.) ve bunların farklı malzemeler kullanılarak güçlendirilmiş formlarının, özellikle hafiflik ve dayanımın birlikte arandığı otomotiv (Liu ve Guan 2019) havacılık, deniz taşıtları, mobilya, inşaat (Monteiro vd. 2018) ve spor ekipmaları gibi (Negro, 2022) çok sayıda endüstride yaygın olarak tercih edildiği bildirilmektedir. Ahşap esaslı kompozit malzemelerin kullanım alanlarının genişletilmesi ve yeni kompozit malzemelerin üretilmesinin yanı sıra mevcut malzemelerin de ekstrem kullanım koşullarına (yük taşıma ve ani yük değişimleri) cevap verebilecek şekilde güçlendirilmesi son yılların güncel çalışma alanları arasında yer almaktadır.

Güçlendirme malzemeleri kullanılarak elde edilmiş ahşap esaslı kompozit malzemelerin ahşap gibi kolay işlenebilmesi ve şekillendirilebilir olması, elde edilecek yeni üründe bulunması arzu edilen önemli bir özelliktir. Bu özellik sayesinde malzemeler, geleneksel ahşap işleme yöntemleri kullanılarak ek yatırım ya da ekipman kullanımına gerek duyulmaksızın biçimlendirilebilir, kesilebilir, birleştirilebilir ve yapılara kolaylıkla entegre edilebilir olmaktadır. Bu çalışma kapsamında üretilmesi düşünülen Güçlendirilmiş Tabakalı Ahşap Kompozit Panel (GTAKP) üretimine ilişkin gerek

akademinin gerekse endüstriyel üreticilerin önünde çözüm bekleyen çok sayıda problem bulunmaktadır. Bu problemler arasında, kullanılan hammadde farklılıklarına göre üretim sürecinin tasarımı, iyileştirilmesi, malzemelerin birleştirilmesi amacıyla yapıştırılmasında karşılaşılan güçlükler gibi temel kavramlar dikkat çeken problemler arasında yer almaktadır. Son yıllarda bu tip problemlerin çözümüne yönelik olarak, gerek endüstriyel gerekse akademik çalışmaların artarak devam ettiği görülmektedir.

Yapılan tez çalışması kapsamında cam ve karbon elyaf dokuma kumaşlar ile güçlendirilmiş tabakalı ahşap kompozit panel (GTAKP) üretilmesi ele alınmıştır. Çalışmanın amacı cam veya karbon elyaf kullanılarak GTAKP üretiminin başarılı bir şekilde kısa üretim çevrim süresinde gerçekleştirilmesidir. Endüstride özellikle lif takviyeli polimer kompozit malzeme üretimlerinde tercih edilen 12-24 saat aralığında oda sıcaklığında kürlenebilen poliüretan ve epoksi esaslı tutkallar kullanılarak sıcaklık etkisiyle arzu edilen yapışmayı sağlayacak şekilde makul bir üretim çevriminde (üretimde darboğaz ve üretim sürecinde aksamaya neden olmayacak kadar kısa sürede) kullanılabilir olduğunun ortaya konulması hedeflenmektedir. Böylece farklı uygulama alanlarında kullanılabilecek hafif, dayanıklı, kolay işlenebilir yeni alternatif bir kompozit malzeme olarak GTAKP'nin endüstriyel olarak (seri üretim) üretilebilir olduğunun ortaya konulması çalışmadaki diğer bir amaçtır. Çalışmanın nihai amaçları arasında, farklı yapısal özelliklere sahip olan ahşap ve polimer kompozitlerin (cam-karbon elyaf) bir araya getirilmesinde kullanılacak üretim faktörleri için optimum parametrelerin belirlenmesi ve parametre tasarımı yer almaktadır. Üretilecek GTAKP malzemenin kalite göstergesi olarak ele alınan, fiziksel (yoğunluk) ve mekanik özellikleri (ED, EEM, VD, DED, YD) üzerinde üretim faktörlerinin etki düzeylerinin belirlenmesi ve optimum faktör seviyelerinin (parametreler), Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmada genel bilgiler bölümünde; ahşap ve ahşap esaslı kompozit malzemeler, bu malzemeleri güçlendirme amacıyla kullanılan güçlendirme materyalleri ve bu malzemelerin yapıştırılmasında kullanılan yapıştırıcı türlerine yönelik genel değerlendirmeler yapılmıştır. Akabinde, ağaç malzemenin güçlendirilmesi ile doğrudan ilişkili olarak daha önce yapılan çalışmalara değinilmiş ve son olarak çalışmanın amacına yer verilmiştir. Materyal ve yöntem kısmında ise çalışma kapsamında kullanılan ağaç türleri ve bunların kullanıma hazır hale getirilmesi, güçlendirme malzemeleri, çalışmada kullanılacak tutkalların belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ön deneme çalışmaları

ve belirlenen tutkallar açıklanmıştır. Ön deneme süreci sonunda elde edilen bulgulara dayanarak deney tasarımı (üretimde kullanılacak ağaç türleri, tutkal türü ve miktarları, pres sıcaklık ve süreleri) belirlenmiş ve GTAKP numune üretim yöntemi ortaya çıkarılmıştır. Yöntem kısmında üretimde kullanılan kontrol faktörlerine bağlı olarak GTAKP'in fiziksel ve mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimi görmek amacıyla yapılan testler ve bu testlerin gerçekleştirilmesine yönelik standartların nasıl uygulanacağına yönelik detaylara yer verilmiştir.

Bulgular ve tartışma kısmında, üretilen örneklerin fiziksel (yoğunluk) ve mekanik özelliklerindeki değişimler ilgili standartlarda belirtilen koşullara uygun olarak ölçülmüş, elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve literatürde sunulan bilgiler ile karşılaştırılmıştır. Akabinde GTAKP'in optimum üretim parametreleri Taguchi yöntemindeki sinyal/gürültü (S/G) oranı grafik ve tabloları kullanılarak belirlenmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde GTAKP'in fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler, olası kullanım alanları ve üretimi için gerekli olan optimum üretim parametreleri verilmiş ve gelecekte yapılacak çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. AHŞAP ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER

Ağaç malzeme higroskopik, heterojen ve ortotropik özelliklere sahip doğal kompozit bir malzemedir (Kretschmann, 2010; Aydın ve Ciritcioğlu, 2022). Bu özelliklerinin yanı sıra kolay işlenebilen, estetik, yalıtkan, kütlelerine oranla yüksek yük taşıma kapasitesine sahip (Okut ve Altınok, 2020), CO₂ depolayabilen, yenilenebilir ve geri dönüştürülebilir olması sayesinde alternatiflerine nazaran çok daha iyi sürdürülebilirlik potansiyeline sahip (Ciritcioğlu ve Çiftçi, 2019; Goldhahn ve Chanana 2021) olan doğal bir yapı malzemesidir. Şekil 2.1’de ahşap malzemenin bazı üstün özelliklerinin görsel olarak ifadesi görülmektedir.



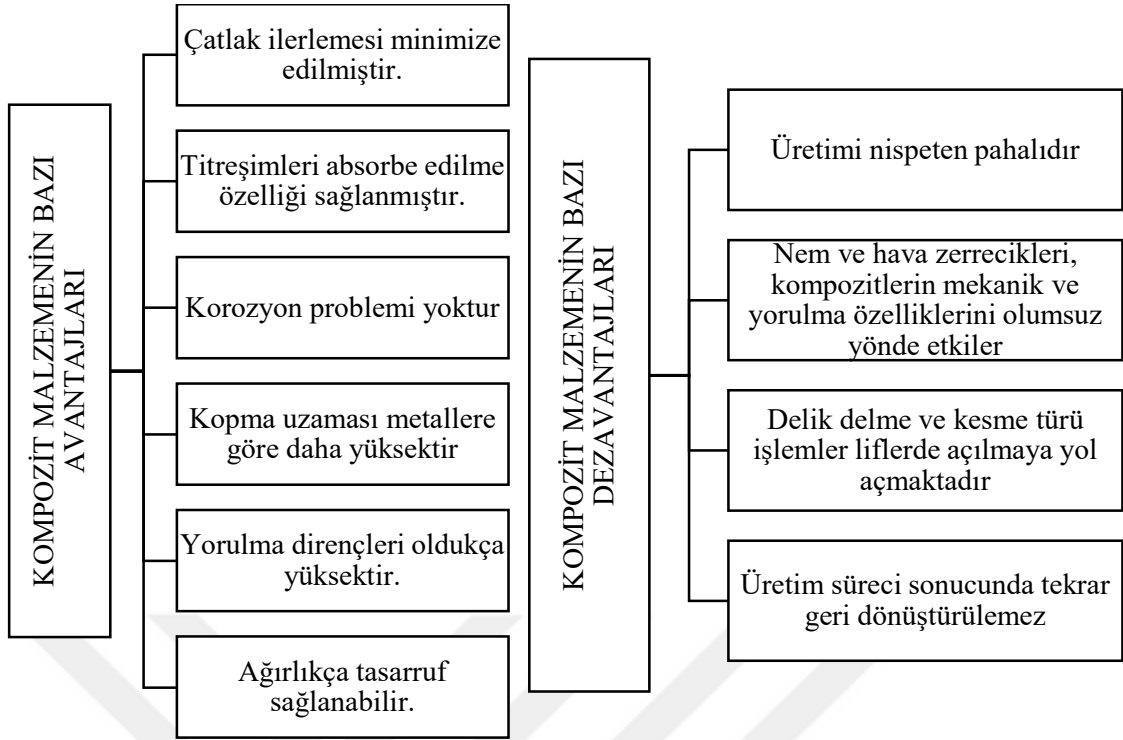
Şekil 2.1. Ahşap malzemenin bazı üstün özellikleri.

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere ahşap malzemenin diğer yapı malzemelerine göre birçok üstün özelliği mevcuttur. Bu üstün özellikleri yanı sıra, rutubet alışverişi ile şekil değiştirmesi, mantar ve böcek zararlılarından etkilenmesi, budak oluşumu, lif kıvrıklığı gibi doğal kusurlarının bulunması ve kolay tutuşması gibi olumsuz özellikler taşımaktadır (Kretschmann, 2010; Okut ve Altınok, 2020; Goldhahn ve Chanana 2021). Bu olumsuz özelliklerden bazıları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Ahşap malzemenin bazı olumsuz özellikleri.

Kompozit, farklı özelliklere sahip birden fazla bileşenin bir araya getirilmesi sonucu ortaya çıkan yapıları ifade etmektedir. Kompozit malzemeler ise doğal haliyle tek tek kendisini oluşturan bileşenlerinde bulunmayan üstün özelliklerin elde edilmesi amacıyla birden fazla malzemenin bir araya getirilmesi sonucu üretilen ve tek bir yapı gibi davranan malzemelerdir (Berthelot ve Ling 1999; Ersoy, 2001). Kompozit malzemelerin sunduğu birçok avantajın yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Pala (2015), tarafından yapılan çalışmada kompozit malzemelerin bazı avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Bu bilgilerden yola çıkarak kompozit malzemelerin sağladığı avantaj ve dezavantajlar Şekil 2.3’de görsel olarak oluşturulmuştur.



Şekil 2.3. Kompozit malzemelerin bazı avantaj ve dezavantajları.

Kompozit malzemeler kullanım alanlarında arzu edilen üstün özelliklerin elde edilmesi ve mevcut malzemelerde görülen kusurların giderilmesi amacıyla da üretilmektedir. Diğer kompozit malzemelerde olduğu gibi ahşap esaslı kompozit malzemeler de, ahşabın bazı olumsuz özelliklerinin giderilmesi ve kullanım alanlarının genişletilmesi amacıyla üretilmekte ve mühendislik ürünü ağaç malzemeler (MAM) olarak tanımlanmaktadır (Güller, 2001; Herajarvi vd., 2004; Mengeloğlu ve Kurt, 2004; Stark vd., 2010; Tankut ve Sözen, 2014; Çavuş, 2019). Ahşap esaslı kompozit malzemelerin tanımlanmasında dil birlikteliği sağlanabilmesi için, Maloney (1986) tarafından üretim yöntemleri, kullanılan malzemeler ve ürün kullanım amacına göre mantıksal olarak bir sınıflandırma önerilmiştir. Bu çalışmada, ahşap kaplamalardan üretilen (kontrplak, LVL, PSL), ahşap laminalar (kaplamalardan daha kalın katmanlar) kullanılarak üretilen (GLULAM, Lamine edilmiş ahşap-ahşap dışı kompozitler vb.) ve küçük boyutlu ahşaplar ya da ahşap atıklarını değerlendirmek üzere üretilen (yonga levha, lif levha, OSB, LSL, OSL vb.) ahşap esaslı kompozitler olarak sınıflandırma yapılmıştır (Stark vd. 2010). Bu malzemeler için her ne kadar ortak bir dil kullanılmaya çalışılmış olsa da Türkçe dilindeki ifade çeşitliliği ve bazı terimlerin karşılıklarının bire bir bulunmaması nedeniyle aynı malzemenin farklı şekilde isimlendirildiği görülebilmektedir.

Ahşap esaslı mühendislik malzemelerden özellikle tabakalı ahşap esaslı kompozitler, ahşabın doğal güzelliğini ve büyük oranda sürdürülebilirlik özelliklerini koruması yanı sıra malzemenin direnç özelliklerinin iyileştirilmesi sonucu sağladığı avantajlar nedeniyle birçok kullanım alanında oldukça yoğun tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır (Ljungberg, 2007; Goldhahn ve Chanana, 2021). Ürün tasarım süreçlerinde malzemelerin sunduğu avantaj ve dezavantajlar dikkate alınmakta ve ortaya çıkarılacak tasarımın hedeflerine uygunluğu açısından değerlendirilmektedir. Ljungberg (2007), sürdürülebilir ürünlerin geliştirilmesi için malzeme seçimi ve tasarım arasındaki ilişkileri değerlendirdiği çalışmada, ağaç malzeme gibi doğal organik malzemeler ve kompozit malzemeleri, sürdürülebilirlik penceresinden değerlendirmiştir. Çalışmada doğal organik malzemeler (ahşap, pamuk, ipek vb.), yenilenebilir ve dönüştürülebilir malzemeler olarak sürdürülebilirlik açısından avantajlar sunmaktadır. Bu doğal malzemeler kullanılarak üretilen farklı kompozit malzemeler ise, atıkların değerlendirilmesi, doğal kaynakların daha verimli kullanılması, hafiflik ve yüksek dayanım gibi avantajlar sağlamakla birlikte genellikle üretim maliyetlerinin yüksek olması ve kompozit malzeme bünyesinde kullanılan farklı malzemelerin ayrıştırılmasında yaşanan güçlükler nedeniyle görece daha düşük sürdürülebilirlik özelliklerine sahip olması bu malzemelerin dezavantajlı yönleri olarak belirtilmektedir (Ljungberg, 2007).

Ahşap esaslı kompozit malzemelerin kullanım alanlarının günümüzde oldukça arttığı bilinmektedir. Bu artış nedeniyle doğal ahşap kaynakların tasarruflu kullanımı açısından daha az malzeme kullanılarak daha fazla iş yapabilme kabiliyeti kazandırmaya yönelik çalışmalar sürmektedir. Bu amaca yönelik olarak üretilen malzemelerden birisi olan LVL (Tabakalı Kaplama Kereste)'nin yapı ve mobilya bileşeni olarak tercih edilen bir malzeme olduğu görülmektedir. LVL, tomruk halindeki ağaçlardan optimum seviyede verim elde edilmesi, dezavantajlarının giderilmesi ve eğimli forma sahip ürün ya da malzeme imalatlarında diyagonal liflilik oluşmaması için soyma yöntemiyle elde edilmiş kaplamaların, lif yönü birbirine paralel olacak şekilde yapıştırılması suretiyle elde edilen levhadır. Küçük ebatlı ağaç malzemelerden kalitece yüksek, ortotropik özellikte ve istenilen şekilde LVL malzeme üretilmektedir (Örs ve Keskin, 2001; Porteous ve Kermani, 2013). Özet olarak LVL, ağaç malzemenin istenilmeyen doğal kusurlarından (budak, çatlak, çürük vb.) arındırılarak üretilmeleri sonucu masif ahşap malzemeye göre daha yüksek dayanıma sahip olmakta ve farklı mühendislik çözümlerinde daha yaygın olarak kullanım olanağı bulmaktadır (Winistorfer vd., 1997; Herajarvi vd., 2004).

Ahşap esaslı tabakalı kompozit malzemelerden bazıları Çizelge 2.1’de görülmektedir (Örs ve Keskin, 2001;Güller, 2001; Tankut ve Sözen, 2014).

Çizelge 2.1 Ahşap esaslı tabakalı kompozit malzemeler.

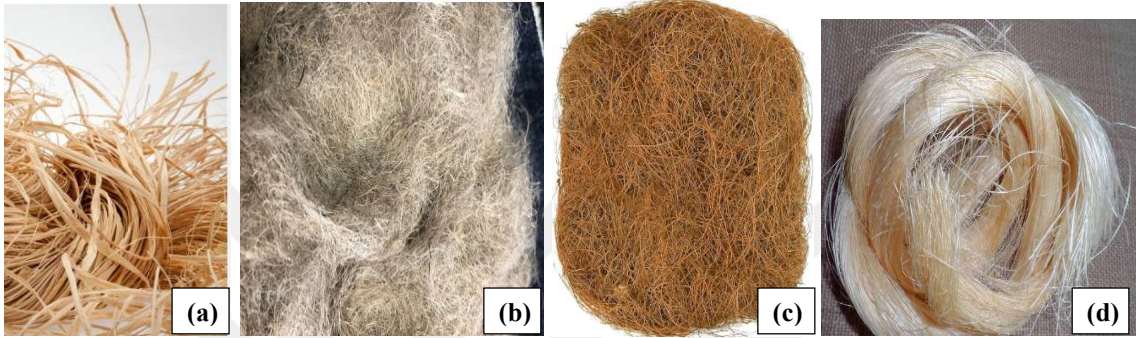
CLT	Cross Laminated Timber	Çapraz Lamine Kereste
GLULAM	Glued Laminated Timber	Tabakalanmış Lamine Kereste
LSL	Laminated Strand Lumber	Tabakalanmış Şerit Kereste
LVL	Laminated Veneer Lumber	Lamine Edilmiş Kaplama Kereste
OSL	Oriented Strand Lumber	Yönlendirilmiş Yonga Levha
PSL	Parallel Strand Lumber	Paralel Şerit Kereste

2.2. AHŞAP GÜÇLENDİRME AMACIYLA KULLANILAN MALZEMELER

2.2.1. Doğal Güçlendirme Elemanları

Ahşap veya ahşap esaslı kompozit malzemelerin güçlendirilmesinde doğal liflerin kullanıldığı bilinmektedir. Doğadan doğrudan elde edilebilen, hafif olmasının yanı sıra üstün mekanik özelliklere sahip olan, biyobozunur özellikteki çevre dostu malzemeler doğal lifler olarak tanımlanmaktadır (Sanjay, 2015). Doğal lifler, endüstriyel kullanıma uygunluğu, üretim maliyetlerinin düşük olması ve bertaraf için düşük enerji tüketimine ihtiyaç duyulmasından ötürü 1990’lı yıllardan bu yana yaygın olarak kullanılmaktadır (Borri vd., 2013). Ayrıca doğada kolaylıkla bulunabilen abaca, muz, keten, bambu, pamuk, hindistan cevizi, kenevir vb. bitkiler atmosferdeki karbondioksit dengelemesine yardımcı olan, üretimi kolay doğal lif kaynaklarıdır (Corradi vd., 2009 ; Lopresto vd., 2011). Doğal lifler güçlendirme malzemesi olarak günümüzde ahşap veya ahşap esaslı malzeme üretiminde de kullanılmaktadır. Örneğin Borri vd. (2013); Gökner masif kirişlerin (20x20x400cm) güçlendirilmesinde keten, bambu, kenevir ve bazalt lifleri kullanmıştır. Yapılan güçlendirme çalışmasında tek katman olarak kullanılan lifler ahşabın gerilme oluşan kenar bölgesine çift bileşenli epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Güçlendirme malzemesi olarak kenevir, keten ve bazalt uygulanmış ahşap kirişlerin eğilme direncinde kontrol grubuna göre %23,2 ile %35,3 arasında iyileşme sağlandığı bildirilmiştir. Yapılan çalışmada keten lifi ile güçlendirilen malzeme bazalt kullanılına göre daha yüksek eğilme direnci sağlamıştır (Borri vd., 2013). Ayrıca Sanjay vd. (2015); Hindistan'da bolca bulunan doğal liflerden (abaca, muz, bambu, pamuk, hindistan cevizi, kenevir, jüt, ananas, sisal vb.) faydalanmış ve cam elyaf ile birlikte kullanmıştır. Bu

çalışmada doğal elyafların cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) ile birleştirildiğinde özelliklerini geliştirdiği ve cam elyafı ile güçlendirilmiş polimer kompozitler için alternatif bir malzeme olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Sanjay vd. 2015). Daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde ahşap ve ahşap esaslı kompozit yapıların güçlendirilmesi amacıyla doğal liflerin tek başına ya da sentetik lifler ile birlikte hibrit olarak kullanıldığı çok sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir (Borri vd., 2013; Bledzki vd., 2002; Speranzini ve Tralascia, 2010; Wdowiak, 2020; Jariwala ve Jain, 2019). Bazı doğal lif örnekleri aşağıda Şekil 2.4’de görülmektedir.



Şekil 2.4. Bazı doğal lif örnekleri a) Muz, b) Keten c) Hindistan cevizi d) Abaca.

2.2.2. Metal Güçlendirme Elemanları

Metal güçlendirme elemanları 1940’lı yıllarda ahşap malzemeleri güçlendirme amacıyla kullanılmıştır Metal-ahşap kompozitlerde takviye malzemesi olarak yaygın şekilde çelik veya alüminyum kullanılmaktadır (Krueger, 1973). Farklı yapısal özellikteki malzemeler hibrit bir şekilde kullanılmaları durumunda, hibrit malzeme ile elde edilebilen direnç, genellikle farklı malzemelerin birbiri ile yapışma kuvveti ile sınırlı olmaktadır (Steiger vd., 2006). Teknolojinin ve malzeme türlerinin geliştirilmesi ile polimer malzemeler hızla kullanılmaya başlanmış ve diğer güçlendirme elemanlarına göre direnç değerleri çok yüksek polimer malzemeler ortaya çıkmıştır.

2.2.3. Polimer Güçlendirme Elemanları

Güçlendirme için kullanılan takviyeler, kompozit malzemelerde arzu edilen (sertlik, yük taşıma vb.) dayanım özelliklerinin elde edilmesini sağlayan önemli bileşenlerinden birisidir. En yaygın kullanılan lif takviyeler arasında cam, karbon, aramid ve bor elyafları yer almaktadır. Bu elyaf türleri içerisinde, bol miktarda bulunması nedeniyle en ucuz olanı cam elyaflardır. Cam elyafın fiber çapı 5 ila 25 μm , karbon elyafın 5 ila 8 μm , aramid elyafın 12,5 μm ve bor elyafın fiber çapı ise 100 μm ’yi bulabilmektedir. İnce lif

yapıları nedeniyle oldukça esnektirler ve uygulama alanlarında arzu edilen farklı form ya da şekillerin elde edilmesine kolaylıkla uyum sağlayabilirler (Mazumdar, 2002).

Lif yapılı polimer kompozitlerde dayanım ve sertlik gibi özellikler kullanılan lifler tarafından sağlanmaktadır. Çoğu lif yapılı polimer kompozit uygulamasında kullanılan lifler sürekli olduğundan ve belirli yönlerde yönlendirildiğinden, bu kompozit malzemeler ortotropiktir ve yapı içerisindeki liflerin yönlerinde çok daha güçlü ve serttirler (Das ve Nizam, 2014). Hallivel (2000), lif yapılı polimer kompozit üretiminde liflerin kullanılmasına ihtiyaç duyulma nedenlerini başlıca beş maddede sıralamaktadır (Hallivel, 2000);

- Yüksek elastikiyet modülü ile tokluk sağlaması
- Büyük yük taşıma kapasitesi ve nihai dayanımı
- Liflerin kendi arasındaki düşük güç değişimleri (homojen yapısı)
- Yük taşımada istikrarlı olmaları
- Düzgün lif çaplarına sahip olmaları

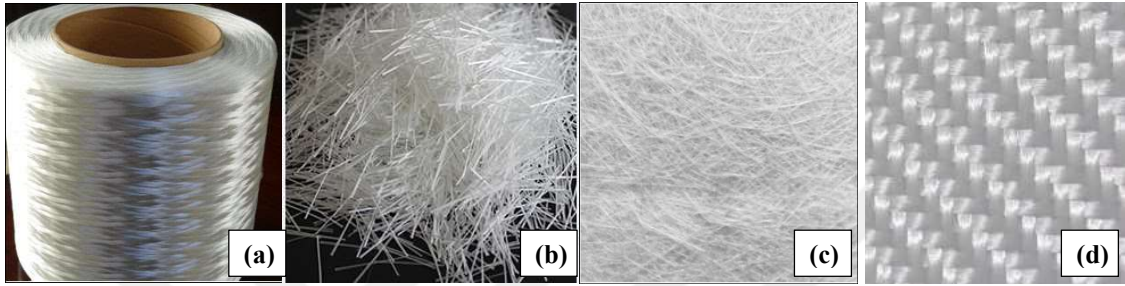
Cam elyafların üretiminde silis kumu, kireçtaşı, borik asit ve kil kullanılmaktadır. Silika toplam bileşenlerin %50'sinden fazlasını oluşturmaktadır. Hammadde dağılımları üretim parametrelerine göre değişiklik göstermektedir. Cam elyafların üç türü bulunmaktadır bunlar E-Cam, S-Cam ve S2-Cam elyaflardır. Bunların içerisinde maliyetçe en düşük olanı E-Cam elyaftır. (Mazumdar, 2002).

Karbon ve grafit elyaflar ise PAN veya zift bazlı öncüller kullanılarak üretilirler. Bu öncül maddeler bir dizi operasyondan geçer. İlk aşamada öncüller aşırı yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak oksitlenir. Daha sonra karbonizasyon ve grafitleşme süreçlerinden geçerler (Agarwal vd. 2006; Mazumdar, 2002). PAN poliakrilonitril (C_3H_3N) doğrusal formülüne sahip bir sentetik yarı kristal organik polimerdir. Zift lifi saflaştırılmış petrol veya kömür katranının dönüştürülmesiyle elde edilir. Karbon fiber üretiminde PAN bazlı polimerler daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Zift esaslı lifler PAN esaslara göre daha sert ve kırılğan olma eğilimindedirler (Mazumdar, 2002).

Düşük maliyetleri nedeniyle oldukça yaygın kullanım alanı bulan cam elyafların yanı sıra, özellikle 1990'lı yıllardan sonra üretim miktarlarındaki artışa bağlı olarak karbon fiberlerin maliyetlerinde yaşanan düşüş sonucu kullanımının da yaygınlaştığı görülmektedir (Agarwal vd., 2006). E-Cam elyafların maliyeti 2,20 \$/kg civarındayken

karbon elyaf ise 6,6–8,8 \$/kg civarında olduğu belirtilmiştir (Mazumdar, 2002).

Lif yapılı polimer kompozitler, askeri araçlar, hava araçları, spor malzemeleri, medikal cihazlar, denizcilik ve koruyucu giyim gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır (Wang ve Gao, 2021). Lif yapılı polimer kompozitler, kullanım yeri ve amacına göre farklı form ya da tiplerde (iplik, kırpık, keçe ya da kumaş) retilmekte ve kullanılabilirlerdir (Agarwal vd., 2006; Mazumdar, 2002; Cevahir, 2017). Farklı formlarda üretilmiş lif yapılı polimer kompozitler şekil 2.5'te görülmektedir.



şekil 2.5. CE retim tipleri a) İplik, b)Kırpık elyaf, c) Keçe, d) Dokuma kumaş.

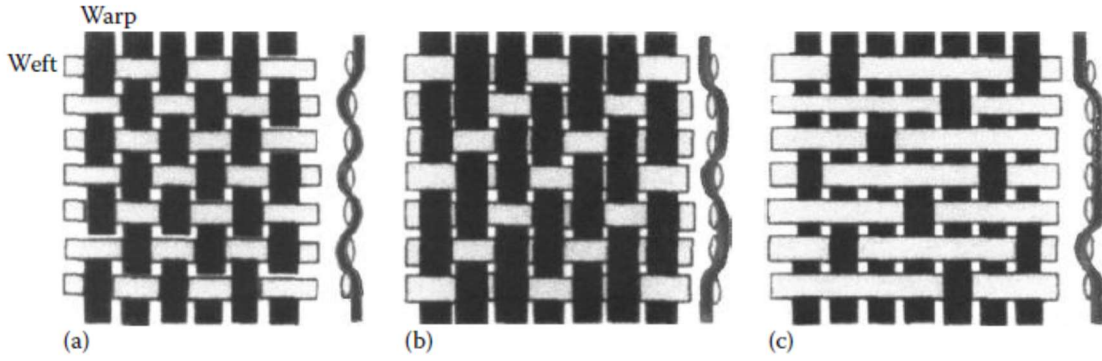
şekil 2.5'de görülen tiplerde karbon ve cam elyaf malzemeler piyasadan tedarik edilebilmektedir. Kırpık formdaki polimer lifleri piyasada özellikle form verilmiş ürünlerin kalıp kullanılarak imalatında kullanılmaktadır. Yapıştırıcı matris ile karıştırılmış kırpık elyafların dökme veya presleme yöntemiyle bir kalıpta şekillendirilmesi suretiyle üretim gerçekleştirilmektedir.

Bu fiberler, kullanım alanlarına yönelik olarak farklı biçimlerde kullanılmaktadır (Das ve Nizam, 2014). Bunlar;

- Mukavemet ve sertlik açısından yüksek performans istenilen alanlarda liflerin paralel ve tek yönde olduğu kompozitler
- Liflerin dokuma kumaş veya keçe haline getirilerek daha fazla yönde mukavemet kazandırıldığı uygulamalar
- Liflerin kısa boylarlar kesilerek (kırpık elyaf) rastgele dağıtılarak yapılan uygulamalar. Bu uygulama ucuz olmasının yanısıra yüksek dayanım gerektirmeyen yapılarda kullanılmaktadır

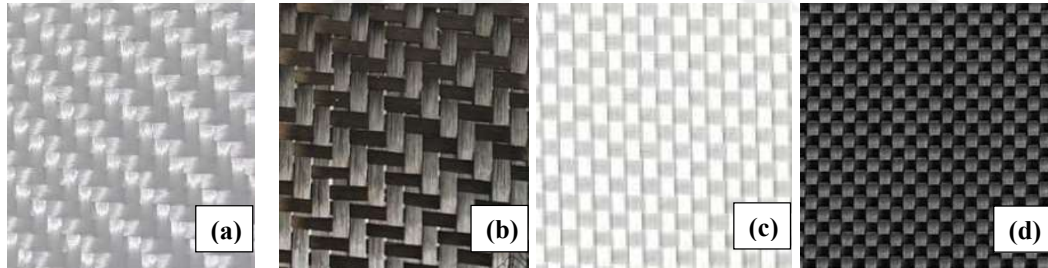
Dokuma kumaş olarak üretilmiş elyafların ise yaygın olarak kullanıma hazır hale getirilmiş reçine emdirilmiş formdaki prepreg imalatında ve yüksek dayanım gerektiren geniş yüzeyli kompozit malzemelerin üretiminde tercih edildiği bilinmektedir.

Dokuma kumaşlar karşılıklı olarak dik iki yön boyunca düzenlenmiş liflerden oluşur: bunlardan birine çözgü yönü (dokuma kumaş rulosunun uzunluk yönü) ve diğerine atkı yönü denir. Lifler birlikte dokunur; bu işlem atkı ipliklerinin önceden belirlenmiş bir deseni takip ederek belirli çözgü ipliklerinin üzerinden ve altından geçmesi anlamına gelmektedir. Dokumada atkı ve çözgülerin geçme şekilleri kumaşın dokuma tipini tanımlamaktadır (Şekil 2.6) (Gay, 2015).



Şekil 2.6. Dokuma kumaş tipleri a) Plain (Düz), b) Twill (Kaz ayağı) c) Satin (Saten).

CE ve KE kullanılarak plain ve twill olarak üretilmiş dokuma kumaşların görselleri Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7. Twill Elyaf dokuma kumaş a) Cam, b) Karbon; Plain dokuma kumaş c) Cam, d) Karbon.

Literatürde ahşap veya ahşap esaslı ürünlerin güçlendirilmesi işlemlerinde; lif yapıları, yüksek dayanıma sahip olmaları, kolay temin edilebilir olmaları ve maliyet gibi sundukları çok sayıda avantaj nedeniyle polimer güçlendirme elemanlarından CE veya KE dokumaların sıklıkla tercih edildiği görülmektedir (Wei vd., 2013; Schober vd., 2015; Nadir vd. 2016; Song vd., 2018; Karaman ve Yıldırım, 2018).

Malzemeye kazandırdığı ek dayanım özellikleri, GTAKP üretimi için uygunluğu ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle twill dokuma elyaf çalışma kapsamında yapılacak üretimde tercih edilmiştir. Twill (kazayağı) dokuma tercih edilmesindeki sebep, plain dokumaya göre liflerin farklı yönlendirilerek çok yönlü kuvvetlere karşı malzeme

direncini olumlu yönde etkileyebilme potansiyeli olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple çalışma kapsamında üretilecek olan GTAKP'lerde twill dokuma cam ve karbon elyaf kullanılmasına karar verilmiştir.

2.3. YAPIŞTIRICILAR

Yapıştırıcılar, uygulandıkları yüzeylerde, parçaları birbirine bağlama özelliğine sahiptir ve farklı şekillerde sınıflandırılabilirler. Üretim biçimine göre doğal (jelatin, kauçuk, reçineler vb.) ve sentetik olarak ayrılırken sentetik yapıştırıcılar kendi içerisinde termoplastik (PVAc, Poliamid reçineler vb.) termoset (epoksi, poliüretan, polyester, formaldehit) ve elastomer (silikon, neopren, yapay kauçuk) yapıda olabileceği belirtilmiştir (Ebnesajjad ve Landrock. 2015). Bir diğer çalışmada fiziksel hallerine göre tek bileşenli sıvı yapıştırıcılar, iki bileşenli sıvı yapıştırıcılar ve film yapıştırıcılar olarak sınıflandırılmışlardır (Solmaz ve Turgut, 2009).

Ahşap ürünlerin kullanım ömrü birçok malzemeye göre uzundur; özellikle tutkallanmış ahşapta kullanılan yapıştırıcının iyi bir dayanıklılığa (kullanım yerinde maruz kaldığı rutubet ve yüklerden dolayı yapışma katmanından ayrılma olmaması) sahip olması gerekmektedir (Frihart, 2009).

Ahşap veya ahşap esaslı kompozit malzemelerdeki yapışma kalitesini, kullanılan yapıştırıcı türü ve karakteristik özellikleri (viskozite, katı madde miktarı, kürlenme özellikleri vb.) yapıştırılan yüzeylerin yapısı (yüzey pürüzlülüğü, temizliği vb.), malzeme ıslanabilirliği, tutkal miktarı gibi birçok etken değiştirmektedir (Altınok, 2002; Frihart, 2009; De Melo ve Del Menezzi, 2014).

Ahşap esaslı kompozit panel üretiminde, kullanılan yapıştırıcı ve uygulanma yöntemine bağlı olarak oluşan tutkal katmanının, üretilen kompozit malzemenin performansı üzerinde kritik bir öneme sahip olduğu bildirilmektedir (Modzel vd. 2011). Ayrıca yapıştırımda kullanılan tutkalın miktarı, yapışmanın istenilen düzeyde olmasını doğrudan etkilemektedir. Örneğin; tutkalın ahşap katmanlarına sık bir şekilde nüfuz etmesinin kimyasal bağlanma veya mekanik tutunma için tutkal hattında çok az iç yüzey temasına izin verdiği bu sebeple ahşabın mekanik olarak birbirine tutunmasını olumsuz yönde etkilediği belirtilmektedir (Stoeckel vd., 2013).

Ahşap malzemelerin yapıştırılmasında kullanılan tutkalın, malzemeye penetrasyonu (malzemeye nüfuz etme) ile malzemenin direnci arasında doğrudan ilişki olduğu

bilinmektedir (Kumar ve Pizzi, 2019). Ayrıca yapışma kusurlarının ortaya çıkmasındaki başlıca nedenlerin, yeterli tutkal miktarının kullanılmaması, tutkalın malzeme yüzeyindeki dağılımının yetersiz olması, yeterli penetrasyonun sağlanamaması, kullanılan yapıştırıcı türünün yapıştırılmak istenen aynı veya farklı malzemeler ile uyumsuz olması gibi faktörler olduğu bildirilmektedir (Pizzi ve Mittal, 2003; Hunt vd., 2018; Pizzi ve Mittal, 2018; Parlak, 2023). Bu kusurlar sonucu ortaya çıkan en önemli üretim sorunları arasında, delaminasyon (katman ayrılması) yer almaktadır.

Johnson ve Kamke (1992), yapıştırıcının ahşap içerisine nüfuz etmesi ve çeşitli ağaç türlerindeki nüfuz durumunu inceledikleri çalışmada farklı boyama teknikleriyle florasan mikroskobu kullanarak tutkal penetrasyonunu ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda tutkalın ağaç malzemeye sığ nüfuz etmesinin kimyasal ve fiziksel yapışma için çok az iç yüzey temasına izin verdiği ve aşırı nüfuz etmesinin ise tutkal hattının “aç kalmasına” neden olduğu belirtilmektedir. Ayrıca tutkalın ağaç malzemeye nüfuz etmesi ile prepolimerin moleküler ağırlık dağılımı arasında ilişki bulunduğu ve daha yüksek ağırlık ortalamalı moleküllerin zayıf penetrasyona neden olduğunu bildirmektedir (Johnson ve Kamke, 1992).

Doğal olmasının yanı sıra heterojen bir yapıya sahip olan ahşap malzeme, ağaç türü, yetiştirme alanı, anatomik özellikleri, yüzey özellikleri, sahip olduğu rutubet miktarındaki değişkenlikler vb. çok sayıda faktör nedeniyle yapışma özelliklerinde farklılıklar göstermektedir (Kamke ve Lee, 2007; Frihart, 2009; Hunt vd., 2018). Aynı kimyasal özelliğe sahip olan yapıştırıcılar ile heterojen yapıdaki ağaç malzemeyi yapıştırmanın yanı sıra ahşaba farklı yapısal özelliklere sahip polimer malzemelerin yapıştırılmasındaki performans ürün nihai kalitesi açısından büyük önem arz etmektedir (Schober vd., 2015, Gardner vd., 2015).

Ahşap malzemeler arasındaki farklar, yapıştırıcının yüzeye ve gözeneklere iyi derecede nüfuz etmesi, homojen olarak iyi bir bağ dokusu oluşturması ve kürlenme süreçleri başarılı malzeme üretimi için başlıca temel unsurlardır (Kamke ve Lee, 2007).

Ahşap esaslı kompozit malzemelerde ve bu malzemelere yapılan güçlendirme uygulamalarında, üre formaldehit (ÜF), fenol formaldehit (FF), melamin formaldehit (MF), poliüretan, epoksi reçine esaslı tutkallar gibi çok sayıda tutkal türünün pratikte kullanıldığı görülmektedir. Anılan tutkallar çalışma kapsamında üretilecek GTAKP için kullanım potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde GTAKP

üretiminde olası kullanım imkanı olan tutkal türleri hakkında temel bilgiler aşağıda sunulmuştur.

2.3.1. Üre Formaldehit Tutkalı (ÜF)

Üre formaldehit tutkalı amino bazlı reçine grubunda olup odun hammaddesine dayalı kompozit levha ve tabakalı ağaç malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan tutkal türlerinden biridir (Ayrılmış vd., 2015; Çamlıbel ve Akgül, 2021). Bu tutkal türü piyasada sıvı veya toz olarak tedarik edilebilir ve firma önerisine göre su ile karışım yapılarak kullanılabilir.

Maliyetinin çoğu tutkal türüne göre düşük olması, farklı sıcaklıklarla sertleşme koşullarının değiştirilebilmesi, suda çözünabilir olması, düşük sertleşme sıcaklığı, mikroorganizmalara karşı dirençli ve renksiz olması gibi özellikler ÜF tutkalının bazı avantajlarını oluştururken, yüksek sıcaklık, su ve nem'e karşı dayanıksız olması gibi bazı dezavantajları olduğu bilinmektedir (Hematabadi, vd., 2012; Mittal, 2015).

Sıcaklığın bu yapıştırıcının kurlenmesi üzerinde önemli ölçüde etkisi olduğu bilinmektedir. Her ne kadar soğuk preslemeye uygun bir yapıştırıcı türü olsa da LVL üretiminde genellikle 90-110 °C sıcaklıkta preslenerek tutkalın hızlı olarak kurlenmesi sağlanır ve üretim çevrim süreci hızlandırılabilir (Özdemir, 2020).

2.3.2. Fenol Formaldehit Tutkalı (FF)

Fenolik reçineler, formaldehit ile birlikte fenol türevleri arasında gerçekleşen reaksiyon ürünlerinin oluşturduğu yapıları kapsayan termoset polimerlerin büyük bir ailesidir (Mindivan ve Gürses, 2020). Fenol ve formaldehit arasındaki reaksiyon mekanizması halen tam olarak anlaşılabilmiş değildir. Bununla birlikte reaksiyonun, benzen halkasının hidroksil grubu tarafından aktivasyonu ile başlatıldığı, böylece bir metilol grubunun (CH_2OH) benzen çekirdeğine orto ve para pozisyonlarında katıldığı bilinmektedir (Pizzi ve Ibeh, 2014). İki tip fenolik reçine bulunmaktadır. Reaksiyon eğer bir alkalik katalizör kullanılırsa resol ve bir asit katalizörü kullanılırsa novolak reçineler elde edilmektedir (Mindivan ve Gürses, 2020; Pizzi ve Ibeh, 2014). Novalac reçinesi, esnek bir termoplastik polimerle harmanlanarak novolak reçinesinin değiştirilmesine izin verilen bir kurlenme maddesi olmadan neredeyse çapraz bağlanamaz. Novolak reçinesinin aksine resol reçinesinin yalnızca ısıtılarak kurlenmesi sağlanabilir (Choi vd., 2002). Bu nedenle levha üretiminde genellikle resol türü FF reçineleri tercih edilmektedir (Pizzi ve Ibeh, 2014).

FF ahşap esaslı malzeme yapıştırıcıda sıklıkla kullanılan bir tutkal türüdür. Panel üretimi sırasında FF reçinesinin ahşap malzeme içindeki kürlenme davranışı, hem üretim koşullarını (pres süresi, sıcaklığı) hem de ahşap ürünlerin fiziksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir (He ve Riedl, 2004).

Diğer fenolik reçineler kullanılarak üretilen levhalara göre dış ortam koşullarına, nem ve ısıya direnci yüksektir. FF tutkalı aminoplastik bazlı yapıştırıcılardan farklı olarak önemli bir grubu oluşturmaktadır. Sıcaklık etkisiyle kürlenene tutkal, yonga / lif levha, kontrplak, yönlendirilmiş yonga levha ve rutubete karşı dayanım gereken kullanım alanları için levha üretimlerinde tercih edilmektedir (Dunky ve Niemz, 2002; Pizzi ve Mittal., 2003; Salthammer vd., 2010).

Fenol Formaldehit tutkalı 135-165 °C sıcaklıklarda sertleştiği ve sıcaklığın artmasına bağlı olarak kürlenme hızının arttığı bilinmektedir (Dunky ve Niemz, 2002).

2.3.3. Melamin Formaldehit Tutkalı (MF)

ÜF tutkalı genellikle iç mekanlarda ve ıslak/nemli olmayan alanlarda kullanılan ürünlerin yapıştırılmasında kullanılırken MF tutkalı suya ve nem'e karşı dayanıklılığının yüksek olmasıyla bilinmektedir (Mittal, 2015). Melamin Formaldehit tutkalı 90-140 °C sıcaklıklarda herhangi bir sertleştiriciye ihtiyaç olmaksızın kürlenene bir tutkal türüdür (Bozkurt ve Göker 1990; Filiz vd., 2011). Bu tutkal türü son yıllarda maliyetinin artmasından dolayı ÜF ile belirli oranlarda karıştırılarak (80:20, 30:70, 50:50) maliyet azaltılması mümkün kılınmaktadır (Mittal, 2015).

2.3.4. Poliüretan Tutkal (PU)

Poliüretanlar ilk kez 1938 yılında Otto Bayer tarafından elde edilmiştir. PU'nun en bilinen ticari örneği, 1958 yılında DuPont tarafından pazara sunulan Lycra isimli poliüretan elyafıdır (Janik vd., 2014).

Poliüretan esaslı tutkal çift bağ kurmuş alkol ile buna uygun olan isosaiyanattan üretilmektedir. Adezyon ve kohezyon kuvvetleri çok yüksek olduğu bilinmektedir. Asit, yağ, sıcak su etkisi ve mikroorganizmalara karşı direnci yüksek bir tutkaldır. Oda ısısında sertleşebilen tutkalın sıcaklık etkisi ile kürlenme süreci değişmektedir (Perçin vd., 2009).

PU tutkallar birçok malzeme için kullanımı uygun olduğundan sandviç yapıları ürün bileşenlerini yapıştırıcıda en çok kullanılan yapıştırıcılardan biridir. Ayrıca bu yapıştırıcı türünde çözücü madde bulunmadığından ötürü çevre dostu oldukları söylenebilmektedir

(Ayrılmış vd., 2015). Piyasada tek ve çift bileşenli olmak üzere iki farklı türde bulunmakta ve temin edilmektedir. PU tutkalı, kullanım alanındaki nem ile tepkimeye girerek sertleşirler, bu nedenle kuru yüzeylerde kürlenme hızını artırmak amacıyla yüzeyin nemlendirilmesi önerilmektedir (Örs vd., 1999; Örs vd., 2004; Dizel ve Uzun, 2007; Ayrılmış vd., 2015). PU tutkal su ve neme karşı dayanımlarının yüksek olması sebebiyle, rutubete karşı dayanım gereken uygulama alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sebeple piyasada ve uygulayıcılar arasında deniz tutkalı olarak da anılmaktadır (Özalp vd., 2009).

2.3.5. Epoksi Reçine Esaslı Tutkal (EPX)

Epoksi esaslı reçineler; genellikle iki bileşenli polimer esaslı sentetik bir reçine türüdür. Bu malzeme ilk olarak 1970'li yıllarda hasar görmüş yapıların onarımlarında kullanıldığı bilinmektedir. İyi bağ dokusu oluşturması, oldukça iyi mekanik özelliklere sahip olması, korozyon oluşmama gibi üstün özelliklere sahiptir (Broughton ve Hutchinson, 2001; Stoeckel vd., 2013).

Maliyetlerinden ötürü ahşap esaslı kompozit üretiminde veya ahşap tutkalı olarak ilk sıralarda tercih edilmemesine rağmen (Stoeckel vd., 2013) üstün mekanik özellikleri, nem ve sıcaklığa karşı direncinin iyi olması, iyi boşluk doldurma ve yüksek adezyon kabiliyeti nedeniyle, ahşap veya kompozitlerin lif malzemeler kullanılarak güçlendirme işleminde yapıştırıcı olarak kullanılmaktadır (Song vd. 2018; Valle vd. 2019; Davalos vd. 2000). Ahşap malzemelerin karbon elyaf ile güçlendirilmesinde EPX tutkal tercih edilmekte olup, optimum sıcaklık seviyesinde en iyi güçlendirmenin elde edildiği bildirilmektedir (Karaman vd., 2018).

Düşük pres basıncının yeterli olması ve yüksek boşluk doldurma kabiliyeti sayesinde epoksi yapıştırıcılar kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak tercih edilmelerinin yanı sıra yapılarda beton kolon-kiriş güçlendirme çalışmalarında da sıklıkla tercih edilmektedir (Davis, 1997; Wheeler ve Hutchinson 1998; Broughton ve Hutchinson 2001; Turgut vd., 2017; Ustabaş vd., 2020). Epoksi esaslı yapıştırıcılar birçok malzemeyi yapıştırmada kullanılmaktadır. Bunlar arasında cam, metal, ahşap, plastik vb. olduğu bilinmektedir (Bulleit, 1983).

2.4. DENEY TASARIMI VE OPTİMİZASYON

Bu çalışma kapsamında ahşap kaplamalardan üretilen LVL'lerin karbon ve cam elyaf dokuma malzemelerle güçlendirilmesi ve Taguchi metodu kullanılarak en uygun üretim koşullarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Günümüzde Taguchi metodu, bilim insanları tarafından da en çok kullanılan deney tasarımı yöntemlerinden biridir. Taguchi metodunda, tüm kombinasyonları içeren tam faktöriyel deneme yerine ortogonal dizinlerden yararlanılır. Ortogonal dizilerden yararlanılarak deney sayısı azaltılmaktadır. Bu sebeple büyük oranda zaman ve maliyet avantajı sağladığı gibi, hızlı şekilde kalite problemlerinin çözülebilmesi de sağlanmaktadır.

Bu aşamada üretilecek GTAKP'in kalite özellikleri üzerine etki eden faktörler ve bunların seviyeleri belirlenmelidir.

GTAKP üretiminde dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri de yapıştırma işlemidir. Pres işlemi esnasında uygulanan pres sıcaklığı, pres süresi ve tutkal miktarı hem üretilen malzemenin mekanik özellikleri hem de üretim maliyetleri açısından belirleyici role sahiptir.

Bunların başında kullanılan yapıştırıcıların oda sıcaklığında uzun sürede kürlenmesi gelmektedir. Bu sebeple, kullanılan tutkalların seri üretim için çok uyumlu olmadığı söylenebilir.

Yapılan çalışmada üretim çevrim sürecini hızlandırmak amacıyla sıcak pres tercih edilmiştir. Bu sayede tutkalların kürlenme periyotlarını hızlandırmanın yanı sıra farklı üretim parametreleri ile üretilen levhaların mukavemet değerlerinden elde edilen sonuç değerler ve buna bağlı olarak optimum üretim parametrelerinin ortaya çıkartılması amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda farklı yöntemler kullanılarak deney tasarımları oluşturulabilir. Bu deney tasarımlarından ortaya çıkan sonuçların doğruluğu yapılan deney çalışmasındaki deneme sayılarıyla ilişkili olarak artmaktadır. Deney tasarımı oluşturulmadan önce üretim koşullarını belirlemek üzere deneme amaçlı ön deneme çalışmalarının yapılabileceği bildirilmiştir (Lazic, 2004).

Deney tasarımı ve istatistiksel yöntem seçimi, yapılacak olan deneylerden elde edilen parametrelerin işlenmesi ve yorumlanması için büyük önem arz etmektedir.

Farklı istatistiksel yöntemler ile yapılan deney tasarımlarının uygulama zorluğu veya bazı durumlarda yetersiz kalması sebebiyle, yapılan deneylere ait varyasyon ve regresyon analizi sonuçları, işlemi veya etkin süreci doğru bir şekilde belirleyememektedir (Breyfogle, 2003). Bu sebeple klasik yöntemlerin yetersizliklerini giderebilmek üzere aşağıda belirtilen istatistik yöntemler kullanılarak daha kapsamlı analizler yapılabilmektedir (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

- I. Tam faktöriyel
- II. Kesirli Faktöriyel
- III. Taguchi Metodu

2.4.1. Taguchi Deney Tasarımı

Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bu yöntem ‘Taguchi metodu’, üründe ve süreçte, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deney tasarımı metodudur. Bu metotta faktörlerin seviyelerini tespit etmede; gözlem, sıralama, sütun farkları, varyans analizi ve faktör etkilerinin grafiksel gösterimi yöntemlerinden birisi uygulanmaktadır (Canıyılmaz ve Kutay, 2003).

Taguchi ortogonal deney tasarımı, aynı anda birden fazla faktörün göz önünde bulundurulmasını sağlamakla birlikte, daha az deney yapılarak optimum sonucun elde edilmesini sağlamaktadır. Böylece yapılacak denemeler için harcanan zaman ve maliyetler azaltılabilmektedir (Şirvancı, 1997; Breyfogle, 2003; Gökçe ve Taşgetiren, 2009). Ayrıca Taguchi yöntemi ile faktörlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etki düzeylerinin de belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu sayede iyileştirilmesi arzu edilen sonuç değer üzerinde faktörlerden hangisinin daha etkili ya da önemli olduğunun belirlenmesini de mümkün kılmaktadır. Taguchi tarafından önerilen bu yöntemde tasarım kalitesi 3 temel sürece dayanmaktadır (Gökçe ve Taşgetiren, 2009; Kumar vd., 2011; İç ve Yıldırım, 2012). Bunlar;

- Dikey dizilim (orthogonal arrays)
- Sinyal-gürültü oranı (S/N ratio)
- Kayıp fonksiyonu (loss function)’dur.

Faktör ve seviyelerin fazla olması durumunda yapılan deneyler zor ve zahmetli

olacağından deney maliyetlerini artıracakı öngörülebilir. Taguchi bu sorunu gidermek amacıyla deney sayısının minimize edilmesini ve buna bağı olarak oluşacak maliyet ve harcanacak zamandan tasarruf edilmesini ve sonuç olarak yapılacak deneylerde en uygun sonuçları elde etmeyi sağlayabilecek dikey dizin deney tasarımı uzun çalışmalar sonucu geliştirmiştir (Taguchi vd., 2005).

Ayrıca Taguchi, ürün ve süreç tasarımı için üç kalite aşaması tanımlamaktadır:

- **Sistem tasarımı:** Kavram oluşturma aşamasıdır.
- **Parametre tasarımı:** Ürün ve süreç için hedef oluşturma aşamasıdır.
- **Tolerans tasarımı:** Sonucun istenilen hedefe ulaşamadığında yapılan ilave çalışmalardır.

Taguchi, varyasyonu azaltmak amacıyla, deney tasarımında performans kriteri olarak kullanılmak üzere, sinyal/gürültü oranı (S/N) olarak adlandırılan bir dizi istatistik geliştirmiştir. Taguchi, uygulamadaki problemleri, hedefin türüne göre üçe ayırmış ve her biri için farklı bir sinyal/gürültü oranı tanımlamıştır (Şirvancı, 1997).

En küçük – En iyi; sonuç parametre değerinin minimum olması istenilen durumlarda tercih edilir örneğin yüzey pürüzlülüğü gibi. Kalite değişkeni Y'nin hedef değeri sıfırdır. Bu durumda sinyal/gürültü oranı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır

$$\frac{S}{N} \text{Oranı} = -10 \cdot \log \left(\sum \frac{Y^2}{n} \right) \quad (3.1)$$

En büyük – En iyi; sonuç parametre değerinin maksimum olması istenilen durumlarda tercih edilir örneğin yapışma direnci, eğilme direnci vb. gibi. Bu durumda kalite değişkeni Y'nin hedef değeri sonsuzdur ve sinyal/gürültü oranı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır;

$$\frac{S}{N} \text{Oranı} = -10 \cdot \log \left[\sum \left(\frac{1}{Y^2} \right) / n \right] \quad (3.2)$$

Hedef değer – En iyi; Bu tür problemlerde, kalite değişkeni Y için belli bir hedef değer (örneğin, ürün boyutları gibi) verilmiştir. Bu durumda sinyal/gürültü oranı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır;

$$\frac{S}{N} \text{Oranı} = 10 \cdot \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right) \quad (3.3)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.4)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.5)$$

Burada y_i : Performans karakteristiğinin i . gözlem değeri, n : 1 denemedeki test sayısı, $\bar{y}$: Gözlem değerlerinin ortalaması, S^2 : Gözlem değerlerinin varyansı olup S/N oranı büyüdükçe hedef etrafında ürün varyansı küçülür. Her üç problem tipinde de amaç S/N oranını maksimize etmektir (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

Tez kapsamında, farklı parametrelere dayalı üretimlerinin gerçekleştirilmesi ve optimum üretim parametresinin sunulması hedeflenmiştir. Faktör ve faktör seviyelerinin artması, faktörlerin etki değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir. Deney tasarımının tam faktöriyel deney tasarımları kullanılarak yapılması için değişken faktör ve seviyelerinin artması, deney tasarımını büyütmekte ve bu sebeple üretimlerin uzun sürede gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Bu durum istatistiksel olarak sürecin tıkanma olasılığını ortaya çıkartmaktadır. Bu ve benzeri olumsuzlukları gidermek amacıyla Taguchi deney tasarımı uygulanarak deneylerin yapılması uygun görülmüştür.

Birçok çalışmada; Taguchi deney tasarımı minimum deneme sayısı ile maksimum bilgi sağlayarak zaman ve kaynakların etkin bir şekilde kullanılmasını, süreç değişkenlerinin çevresel faktörler üzerinde etkisini değerlendirerek süreçlerin çevresel faktörlere karşı daha dirençli hale getirilmesini ön görmektedir. Ayrıca üretimde istenilen kalite ve performans seviyelerine ulaşılabilir olmasını ve değişken parametreler arasında etkileşimleri değerlendirerek en iyi sonuçları verdiği bildirilmiştir (Hafeez vd., 2002; Atkinson vd., 2007; Karna ve Sahai, 2012).

Taguchi optimizasyonu belirli deney tasarımı adımları kullanılarak uygulanmaktadır (Lunani vd., 1997). Bunlar ;

- Problemin tespiti,
- Deneyin amacının belirlenmesi,
- En iyi performansın belirlenmesi,
- Performans karakteristiklerini etkileyeceğine inanılan faktörlerin belirlenmesi,
- Faktörlerin kontrol ve gürültü faktörleri olarak ayrılması,
- Deney tasarımının belirlenmesi,
- Elde edilen verilerin toplanması,
- Verilerin irdelenmesi,

- Ortaya çıkan sonuçların yorumlanması,
- Doğrulama deneyleri yapılarak teyit edilmesi,

olarak belirtilmektedir. Burada görüldüğü üzere belirli işlem basamakları takip edilerek son işlem basamağı olan doğrulama deneyinin yapılmasıyla yöntem sonlanmaktadır. Doğrulama işlemi, en iyi S/G oranındaki faktör parametreleri ile elde edilen deneysel sonucun belirli bir güven düzeyinde belirlenen güven aralığı (CI-Confidence Interval) yani sınır değerler (gerçek ortalamanın maksimum ve minimum sınırları) içinde olup olmadığının kontrol edilmesi esasına dayanmaktadır. Güven aralığı için sınır değerlerin hesaplanmasında aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır (Ross, 1996; Liu vd., 2010; Samtaş ve Korucu, 2019).

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,Ve} \times V_{ep} \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (3.6)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (3.7)$$

Burada $F_{\alpha,1,Ve}$ önem düzeyi α 'nın F oranı, α önem düzeyi, $1 - \alpha$ güven aralığı, Ve hatanın serbestlik derecesi, V_{ep} hatanın varyansı, r doğrulama deney sayısı ve n_{eff} etkin ölçülen sonuçların sayısıdır.

2.4.2. Regresyon Analizi

Regresyon analizi bir bağımlı değişken ile bir veya daha çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir (Kılıç, 2013). Ayrıca malzeme performans göstergesi olan mekanik özellikler ile bu özellikleri etkileyen kontrol faktörleri arasındaki sebep sonuç ilişkilerini belirlemek üzere regresyon analizleri yapılmıştır. Yapılan regresyon analizleri sonucu performans göstergesi olan mekanik özelliklere yönelik tahminler yapabilmek amacıyla regresyon modelleri (matematiksel model) oluşturulmuştur. R^2 regresyon denkleminin belirleme katsayısını ifade etmektedir. Her bilim dalında, modelde kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenlerin ilişki oranına bağlı olarak R^2 'nin kabul edilebilir değeri değişmekle beraber en optimal değer 1'e en yakın olan değerdir. R^2 1'e yaklaştıkça; bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi ifade eden regresyon modelinin, istatistiksel olarak reel ilişkiye yakınlığının arttığı kabul edilmektedir. Regresyon denklemini oluşturan

açıklayıcı değişkenlerin bağımlı değişken (yanıt değişkeni) ile basit doğrusal korelasyon katsayılarının (r^2) yüksek (1'e yakın olması) ve kendi aralarındaki doğrusal korelasyonun katsayısının düşük olması (0'a yakın olması) önerilmektedir (Arı ve Önder, 2013). Korelasyon katsayısı r^2 'nin 0,80 ve üzeri olması, kuvvetli ilişki olarak kabul edilmekle beraber, 0,50 – 0,75 arası orta seviyeli ilişki derecesi olarak değerlendirilmektedir. Regresyon denkleminde yer alan açıklayıcı değişkenler ile yanıt değişken arasındaki korelasyonun güçlü olması örnekten hesaplanan regresyon denkleminin belirleme kat sayısı olan R^2 'nin de daha iyi değerler almasını sağlamaktadır (Günel, 2003).

2.5. LİTERATÜR ÖZETİ

Ahşap veya ahşap esaslı kompozit malzemeler, demiryolu traversleri deniz araçları köprüler, deniz iskeleleri ve birçok yapı grubunda kullanıldığı bilinmektedir. Ahşap malzemenin bazı yapısal özelliklerinden ve kusurlarından dolayı mekanik özellikleri düşmekte, bu durum onun çeşitli yapısal uygulamalarda kullanım olanaklarını kısıtlamakta olduğu bildirilmektedir (Koman vd., 2013). Son 20 yılda yapısal elemanları güçlendirmek için fiber katkılı polimerlerin kullanımı, hem yapısal performansları açısından hem de ekonomik olarak etkili olmuştur (Taheri vd., 2009). Ahşap veya ahşap esaslı malzemelerin yük taşıma kapasitesini arttırmak amacıyla lifle desteklenmiş plastiklerin (fiber reinforced plastics - FRP) kullanılması geçmişten günümüze çoğu çalışmada ele alınmış olup kullanılan güçlendirme malzemeleri sayesinde elde edilen yeni malzemelerde direnç, sertlik, yoğunluk vb. çok sayıda özelliğin iyileştirildiği ve düşük mekanik özelliklere sahip malzemelerin güçlendirme malzemeleri ile takviye edilmesinin etkili bir yöntem olduğu bildirilmektedir (Bulleit, 1983; Song vd., 2018).

Ahşap veya ahşap esaslı kompozit malzemelerin güçlendirilmesi amacıyla; metal, alaşım, cam elyaf, karbon elyaf vb. kullanılmaktadır (Bulleit, 1983; Wei vd., 2013; Bal, 2021a). Ayrıca yüksek direnç, düşük ağırlığı ve mekanik etkilere karşı üstün dayanımı sayesinde polimer kompozit malzemeler birçok alanda tercih edilmektedir (Hsissou, 2021).

Ahşap güçlendirme çalışmalarında kullanılan fiber takviyeli plastiklerin (FRP) seçiminde genellikle üstün dayanım özelliklerinden dolayı karbon, cam, bazalt elyaf takviyeli plastikler tercih edildiği ve bu malzemeler ile güçlendirilen ahşap malzemelerin yük taşıma kabiliyetlerinin arttığı bildirilmektedir (Akgül vd., 2009; Zhang ve Shijie, 2011; Yıldırım vd., 2018).

Cam elyaf dokuma kumaş kullanarak güçlendirilmiş LVL' nin mekanik özelliklerindeki değişimlerin incelendiği çalışmada; fenol formaldehit tutkalı kullanılarak Kavak kaplamalardan elde edilen RLVL'nin (güçlendirilmiş LVL), eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerinin %14 - 40 arasında, yapışma direncinde ise ~%19 oranında azaldığı bubnun sebebi olarak kullanılan cam elyafın yüzey pürüzlülüğü olduğu bildirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara dayanarak, LVL'nin dokuma cam elyaflarla takviyesinin, test edilen mekanik özellikler üzerinde bazı olumlu ve olumsuz etkilere sahip olduğu sonucuna ulaşıldığı bildirilmiştir (Bal, 2014a).

Song vd. (2018); ahşap esaslı kompozit malzemeleri güçlendirmek için yüzey modifiyeli E-Cam Elyaf (GFC) kumaş kullanarak yaptığı çalışmada; Kavak kaplama katmanlarına cam elyaf ve belirli oranlarda tutkal (260, 330 ve 400 g/m²) kullanarak, farklı sıcaklıklar (130,145 ve 160 °C) ve çeşitli basınç (0,7; 1,2 ve 1,7 MPa) altında presleme işlemi yapmak suretiyle güçlendirilmiş yeni bir ahşap esaslı kompozit panel üretmişlerdir. Cam elyaf malzemesi katmana serilmeden önce farklı konsantrasyonda (%0,8; %1,3 ve %1,8) silan ajanı (γ -aminopropiltrietoksisilan'ın) kullanılarak daha hidrofilik (su emici) hale getirdiğini ve yapışmalarını arttırdığını bildirmiştir. Üretilen malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerine bakıldığında en iyi üretim parametrelerinin %1,3 γ -aminopropiltiletoksisilan kullanılmış cam elyafın, 330 g/m² yapıştırıcı, 160 °C sıcaklık ve 1,2 MPa basınç altında olduğu belirtilmiştir. Ayrıca GFC dozajları ve kompozitlerdeki pozisyonların farklı fiziksel-mekanik özellikler üzerinde olumlu veya olumsuz etkileri olduğunu saptamışlardır (Song vd., 2018).

Fenol formaldehit tutkal kullanılarak Kavak lamine kaplama kereste (LVL) üretilmiş ve kaplama tabakaları arasına dokuma cam elyaflar kullanarak güçlendirilmiş LVL (RLVL) üretilmiştir. Güçlendirmenin LVL'nin özellikleri üzerindeki etkilerini analiz etmek için bazı fiziksel (yoğunluk, nem, kalınlığına şime vb.) özellikler, dinamik eğilme dayanım özellikleri ve makaslama direnci gibi özellikleri incelemiştir. Test sonuçları yoğunluk, dinamik eğilme ve makaslama direncinin arttığını göstermiştir (Bal, 2014 b).

Karbon elyaf takviyeli (CFR) tutkallı lamine kereste'nin (Glulam) mimari uygulamalarda kullanımını ele alındığı çalışmada; CFR-Glulamın eğilme direncinde kayda değer bir artış olduğu ve ahşap ile karbon elyafın üstün yapışma özelliklerinin bulunduğu bildirilmiştir. Ortaya çıkan yeni ürün (CFR-Glulam) için, ahşap mimari uygulamalarda yapısal bir malzeme olabileceği, ev ve köprü bileşenlerinin yapımı ve onarımı için kullanılabileceği ve daha birçok alanda kullanımının uygun olacağı bildirilmiştir (Ogawa, 2000).

Dokunmamış cam elyaf takviyeli lamine ahşap birleştirmeleri inceledikleri çalışmada; lamine ahşap çerçevelerin dinamik deprem yükleri altındaki davranışlarının istikrarlı olduğunu ancak kiriş-kolon bağlantıları ahşap lifleri üzerindeki gerilmeler nedeniyle kırılğan tipte bir hasara karşı hassas olabileceğini bildirilmişlerdir. Cam elyaf kumaş gibi elyaf esaslı malzemelerin, çekme gerilmelerinin azaltılmasında ve bağlantıların sürekliliğinin arttırılmasında etkili olduğunu belirtmişlerdir (Kasal vd., 2004).

Ahşap yapıların FRP (Fiber takviyeli plastik malzemesi) ile güçlendirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada; güçlendirilmiş ahşap yapı formlarının, köprüler gibi ahşap yapıların diğer geleneksel malzemelerden yapılan yapılarla rekabet edebilmesini sağlamakta olduklarını ve hatta daha iyi mekanik etkilere sahip olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmada epoksi reçineleri kullanarak ahşap kirişlerin ve kolonlarının gerilme bölgelerine karbon elyaf takviyeli, kontrol ve metal şerit kullanılarak güçlendirme işlemleri yapılmış malzemeler incelenmiştir. Özellikle yapıştırma işlemi yapılacak yüzeylerin temiz ve düzgün olmasının yapışma için önem arz ettiği, epoksi tutkalların iyi boşluk doldurma, kürlenme ve yapışma performansının yüksek oluşu sebebiyle tercih edildiği bildirilmiştir. Güçlendirme işlemi karbon elyaf ile yapılan malzemelerin yapı performansında %30 - 140'a varan iyileşmeler olabileceğini bildirilmiştir (Schober vd., 2015).

Gilfillan vd., (2003), Farklı uzunluklarda CFRP laminatlarla güçlendirilmiş masif ahşap kirişleri inceledikleri çalışmada; Portekizde yetişen sahil çamı kullanılarak üretilen lamine kirişlerin yapısal performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu tür kerestelerin düşük yoğunluklu ve küçük boyutlarla karakterize edildiğini, kurutulduğunda burkulma eğilimi gösterdiğini ve lif kıvrıklığı varlığı nedeniyle çekme direncinde başarısız olduğunu belirtmişlerdir. GLULAM tekniği ile bu dezavantajların bazılarını iyileştirilebileceğini, FRP kompozit takviyesinin düşük oranlarının eklenmesinin kirişlerdeki gerilme direncini azalttığını göstermişler, yük taşıma kapasitesinin, kerestenin sıkıştırma sırasındaki davranışına bağlı olduğunu, çok daha tutarlı davranışların yanı sıra, eğilme direncinde önemli bir artış gösterdiği tespit etmişlerdir (Gilfillan vd., 2003).

Ahşap veya ahşap esaslı malzemelerin daha fazla kullanım alanında tercih edilmesi, fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla güçlendirme malzemeleri kullanıldığı görülmektedir. Güçlendirme amacıyla kullanılan malzemeler hammadde özelliklerine göre değişkenlik göstermektedirler.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Güçlendirilmiş Tabakalı Ahşap Kompozit Panel (GTAKP) olarak adlandırdığımız bu yeni malzemenin üretilebilirliği ve mekanik özellikleri üzerine etkisi olan üretim faktörlerinin belirlenebilmesi amacıyla literatür taraması ve ön deneme çalışmaları yapılmıştır. GTAKP üretilmesinde temel üretim yaklaşımı, tabakalı kaplama kereste (LVL) olarak hali hazırda üretilen ahşap esaslı kompozit malzemelerin katmanları arasında, hafif ve yüksek dayanım özelliklerine sahip olduğu bilinen polimer kompozit lif dokuma malzemeler (Cam ve Karbon fiber) kullanılarak güçlendirilme yapılması esasına dayanmaktadır. Bu malzemenin üretilmesinde polimer kompozit lif dokumalar ve soyma ahşap kaplama plakaları kullanılacaktır. Farklı yapısal özelliklere sahip bu malzemeler (ahşap ve polimer kompozitler) arasında yapışma sağlanması için doğru yapıştırıcı ve bu yapıştırıcıların kullanım koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca deney tasarımında kullanılmasına karar verilen tutkallar için üretim süreçlerindeki faktör seviyelerinin alt-üst sınırlarının yaklaşık olarak belirlenmesine de ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürden edinilen bilgiler doğrultusunda farklı tutkal türleri ve kullanım koşulları için deneysel üretimler yapılmak suretiyle kullanılacak tutkal türleri ve üretim sürecinde kullanılacak faktör seviyeleri için sınır değerler belirlenmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel üretimlere ilişkin bilgiler tutkallar başlığı altında parametre tasarımına yönelik ön deneme çalışmaları kapsamlı olarak açıklanmaktadır. Çalışma kapsamında üretilen GTAKP malzemelerin üretim süreçleri ve üretilen malzemelerin olası kullanım yerlerindeki performansını gösterecek fiziksel ve mekanik özellikleri (yoğunluk, eğilme direnci, elastikiyet modülü vb.) yöntem başlığı altında kapsamlı olarak ele alınmıştır.

3.1. MATERYAL

Çalışma konusu olan GTAKP üretiminde kullanılan malzemelerin yanı sıra test ve analizlerde kullanılan cihazlar bu bölümünde açıklanmıştır. Kullanılacak malzemelerin belirlenmesinde daha önce yapılan çalışmalar, malzemelerin bulunabilirliği, üretim süreçlerine uygunluğu ve uygulanabilirliği gibi çok sayıda kıstas dikkate alınarak karar verilmiştir. GTAKP malzemenin üretilmesindeki temel başarı kriteri ağaç malzeme ile polimer kompozit liflerin yapıştırılması sonucu başarılı üretimin olabildiğince kısa bir çevrim süresinde yapılmasıdır. Tutkalların, üretim sürecindeki parametre tasarımı

(kullanım miktarı, uygulama sıcaklığı, süresi vb.) ile doğrudan ilişkili olması ve başarılı üretimin yapılabilir olduğunun ortaya konulmasının gerekli olması nedeniyle kullanılacak tutkallar ön deneme üretimleri ve testler yapılarak belirlenmiştir. Bu deneme ve testlere tutkallar başlığı altında yer verilmiştir.

3.1.1. Ağaç Malzeme

Çalışmada Samsun kavağı (*Populus deltoides* I-77/51) ve Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) olmak üzere iki farklı ağaç türü kullanılmıştır. Bu iki ağaç türü, ülkemizde yaygın olarak yetiştirilmeleri, tabakalı ahşap esaslı kompozit levha endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaları ve kolay temin edilebilmeleri nedeniyle tercih edilmiştir. Samsun kavağı tomrukları Düzce ilinde faaliyet gösteren Temel Orman Ürünleri ve Recep Sivrikaya Orman Ürünleri firmalarından, kayın tomrukları ise Düzce ili Düzce Orman İşletme Müdürlüğünden temin edilmiştir.

3.1.1.1. Samsun kavağı (*Populus deltoides* I-77/51)

Türkiyede yetiştirilen kavak türleri ve klonları “yerli ve yabancı” olmak üzere iki ana kategoride ele alınmaktadır. Yabancı kavaklar ilk defa 1946 yılında ithal edilmeye başlanmış ve ülkemizde 1960’lı yıllarda yaygın olarak yetiştirilmeye başlanmıştır (Birler, 2010). Türkiye’de Samsun adıyla tescil edilmiş ve piyasada aynı isimle anılan I-77/51 Kavak klonu Türkiye’nin Orta Karadeniz ve Marmara Bölgelerinde yaygın olarak yetiştirilen odunu soymalık, kerestelik ve yongalık olarak pazarlanan önemli bir ticari klondur (Koçer vd., 2006). Tunçtaner vd. (1994) 10 adet kavak klonunu büyüme yönünden 4 klonu (77/51, 45/51, S.177-3, I-214) ise bazı teknolojik özellikleri açısından inceledikleri çalışmasında Samsun kavağı olarak tescillenen I-77/51 klonunun özgül ağırlık, hacim ağırlık, basınç, statik eğilme, yarıлма ve sertlik direçleri yönünden diğer klonlara nazaran daha yüksek değerler gösterdiğini bildirmektedir (Tunçtaner vd., 1994). Fakat Samsun klonunun diğer klonlara nazaran başta kuraklık olmak üzere olumsuz yetiştirme koşullarına karşı daha duyarlı olduğu bildirilmektedir (Birler, 2010).

Diğer kavak klonlarına göre daha iyi büyüme ve dayanım özelliklerine sahip olması, özellikle Marmara bölgesinde ve ülkemizde yaygın yetiştirilmesi, kolay elde edilebilir olması gibi temel nedenlerden dolayı çalışmada I-77/51 klonunun kullanılmasına karar verilmiştir. Bu türün tercih edilemesinde, Düzce ilinde faaliyet gösteren soyma kaplama ve kontrplak üreticilerine yapılan ziyaretlerde de I-77/51 klonunun en fazla kullanılan tür olduğunun görülmesi yanı sıra ekonomik değeri ve dayanım özellikleri düşük olan bir

ağaç türünden daha yüksek katma değerli yeni ürünler üretmek suretiyle ekonomiye kazandırmak istenilmesi etkili olmuştur. Samsun kavağı odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (Tunçtaner vd., 1994; Örs ve Keskin, 2001; Koçer vd.,2006) için ortalama değerler Çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1. Samsun kavağı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Fiziksel / Mekanik Özellik	Ortalama Değerler	Kaynak
Tam Kuru Yoğunluk	0,421 g/cm ³ 0,397 g/cm ³	Koçer vd., 2006; Tunçtaner vd., 1994
Hacim Ağırlık	370,43 kg/m ³ 333 kg/m ³	Koçer vd., 2006 Tunçtaner vd., 1994
Eğilme direnci (ED)	65,15 MPa	Tunçtaner vd., 1994
Eğilmede Elastikiyet Modülü (EEM)*	563,8 MPa	Örs ve Keskin, 2001
Liflere Paralel Basınç Direnci (BD)	38,27 MPa	Tunçtaner vd., 1994
Makaslama Direnci (MD)*	6,37 MPa	Örs ve Keskin, 2001

*Kavak için verilmiş ortalama değerlerdir, I 77/51 klonu verisi değildir.

3.1.1.2. Kayın (*Fagus orientalis* L.)

Orman Genel Müdürlüğü (OGM) tarafından hazırlanan Türkiye orman varlıklarının değerlendirildiği çeşitli yayınlarda, Doğu Kayını’nın (*Fagus orientalis* L.) yaklaşık 1,95 milyon hektar (ha) ile oldukça geniş yayılım gösteren ve toplam ülke ormanlarının yaklaşık %8,5’ini oluşturan önemli ağaç türlerinden birisi olduğu belirtilmektedir (Anonim, 2009; 2013). OGM tarafından 2021 yılında hazırlanan bir diğer çalışmada ülkemiz ormanlık alanlarının %32’sini yapraklı (meşe, kayın, kızılâğaç vb.) %48’ini iğne yapraklı (kızılçam, karaçam, sarıçam vb.) kalan %20’lik orman alanının ise ibrelili + yapraklı karışık ormanlar olduğu bildirilmektedir. Aynı araştırmada Doğu Kayınının yaklaşık 1,88 ha ile yapraklı türler arasında meşe’den sonra ikinci sırada en fazla yayılım gösteren yapraklı ağaç türü olduğu bildirilmiştir (Anonim, 2020). Doğu Kayını 30-40 m ye kadar boylanabilen, bir metrenin üzerinde çap yapabilen dolgun ve düzgün gövdeli birinci sınıf odun üretilen bir türdür (Anonim, 1985, Aslan, 1994). Balkanlar’dan Trakya’ya ve kuzeyden Yıldız (İstiranca) Dağları ile İstanbul’a ve Kocaeli yarımadasına, bir miktarda Ege bölgesine inmektedir. Ana yayılım alanı olarak Doğu Karadeniz boyunca Kafkaslara ve Kırım’a uzanmaktadır. Bu ana yayılış dışında 1500 m. üzerindeki yüksek rakımlarda İskenderun Körfezinin kuzey doğusunda Hatay ve Maraş

ormanlarında izole yayılış göstermektedir (Anonim, 2009; 2013). Kayın odunu oldukça sert ve ağır olup, şok mukavemeti yüksektir ayrıca buharla muamele edildiğinde kolayca bükülebilir özelliktedir (Aslan, 1994). Kolay temin edilebilir ve iyi özelliklere sahip olması nedeniyle kullanım alanları oldukça geniştir. Mobilya, bükme mobilya, kontrplak, spor aletleri, masif parke, ayakkabı topuğu, alet sapları, tornacılık, maden direği, travers, ambalaj fiçileri ve sandıkları, masif kaplama, yonga levha, lif levha gibi çok sayıda alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Aslan, 1994; Yaltırık ve Efe, 2000).

Çalışmada Doğu Kayını kullanılması temelde nedenleri arasında ülkemiz ormanlarında geniş yayılım göstermesi, kolay temin edilebilir olması, hali hazırda tabakalı ahşap esaslı kompozit malzeme üretiminde kullanılması, üstün işlenebilirlik ve mekanik özelliklere sahip olması gibi çok sayıda faktör etkili olmuştur. Ayrıca bu üstün özellikleri nedeniyle yüksek katmadegerli GTAKP malzeme üretimine uygun olduğunun düşünülmesi de bir diğer tercih sebebi olmuştur.

Kayın ağacı odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (Kurtoğlu, A. 1984; Malkoçoğlu A. 1994; Yaltırık ve Efe, 1994; Yıldız ve Bircan, 2022)'de görülmektedir

Çizelge 3.2. Doğu Kayını (*Fagus orientalis* L.) fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel / Mekanik Özellik	Ortalama Değerler	Kaynak
Tam Kuru Yoğunluk	0,81 g/cm ³	Yıldız ve Bircan, 2022*
Hacim Ağırlık	531 kg/m ³	Kurtoğlu, 1984
Eğilme direnci (ED)	105,2 MPa 115 Mpa*	Malkoçoğlu A. 1994 Yıldız ve Bircan, 2022
Eğilmede Elastikiyet Modülü (EEM)	1225,2 MPa 14761 Mpa*	Malkoçoğlu A. 1994 Yıldız ve Bircan, 2022
Liflere Paralel Basınç Direnci (BD)	76,3 MPa 55 MPa*	Yaltırık ve Efe 1994 Yıldız ve Bircan, 2022
Makaslama Direnci (MD)	9,78 MPa 6,81 MPa*	Yaltırık ve Efe 1994 Yıldız ve Bircan, 2022

*Çalışmada görülen en yüksek değerler alınmıştır

3.1.1.3. Kaplamaların Hazırlanması

Çalışma sonucunda elde edilecek güçlendirilmiş panellerin birçok farklı alanda kullanımı söz konusu olacaktır. Bu amaç doğrultusunda üretilecek GTAKP'nin farklı bağlantı

elemanları ile kullanılabilir, vidalama/birleştirme yapılabilir ve çeşitli amaçlar için uygun özelliklere sahip bir panel olması düşünülmüştür. Bu tip işlemler için uygun bir kalınlık olan yaklaşık 10 mm kalınlıkta panel üretilmesi planlanmıştır. Çizelge 3.3’de farklı kaplama kalınlıkları ile yaklaşık 10 mm panel üretimi için gerekli kaplama katman sayısı ve ihtiyaç olan tutkal miktarı görülmektedir.

Çizelge 3.3. 10mm LVL üretimi için gerekli kaplama sayısı ve tutkal miktarları

LVL kalınlığı (mm)	Kaplama Kalınlığı (mm)	Gerekli kaplama Adedi	50x50 cm panel için Tutkallaması gereken yüzey alanı (m ²)	Gerekli tutkal Miktarı (G) (200g/m ² üzerinden hesaplanmıştır)
10	0,50	20	4,75	950
	0,70	14	3,32	664
	1,00	10	2,25	450
	1,20	8	1,83	367
	1,50	7	1,42	283
	2,00	5	1,00	200
	2,50	4	0,75	150

Çizelge 3.3’de görüldüğü üzere kullanılan kaplama kalınlığı arttığında gerekli kaplama adedi azalmakta, kaplama kalınlığının azalması durumunda ise gerekli kaplama sayısı artmaktadır. Ayrıca ince kaplamaların kullanılması durumunda tutkal sarfiyatı artmaktadır. Üretimde kullanılacak kaplama kalınlığını belirlemek üzere Düzce ilinde kaplama üretimi yapan Sancaklı® Mobilya AŞ, Kapsan Kaplama® ve Ağaç Sanayii AŞ, HAŞEP® Kaplama AŞ firmalarının görüşleri de alınmıştır. LVL / Kontrplak üretiminde hâlihazırda yağın olarak kullanılan en ince kaplama kalınlığının 1,2 mm olduğu görülmüştür. Ayrıca soyma kaplama üreten işletmelerin çoğunda kalınlık olarak 1,2 mm kalınlığında seri olarak üretim yapıldığından bu kalınlıkta kaplama teminin kolay olacağı görülmüştür. Bunun yanı sıra farklı bir ağaç türü ile kaplama hazırlanmak istenmesi durumunda, üreticilerin yeniden makine ayarlamalarına ihtiyaç duyulmaması için çalışmada 1,2 mm kalınlığında soyma kaplamalar kullanılması uygun bulunmuştur. Bu nedenlerden dolayı GTAKP üretimi için 1,2 mm kaplama kalınlığı ve 8 katman olarak üretimler planlanmıştır. Kaplama üretimi için kesimi yapılan her iki tomruk türü iki gün içerisinde Düzce ilinde soyma kaplama imalatı yapan Sancaklı Mobilya AŞ’ne nakledilmiştir. Kavak tomruklardan elde edilecek kaplamaların üretimi, aynı gün içerisinde 15 m/dk. üretim hızına sahip milli kaplama soyma makinesinde 1,2 mm

kalınlıkta gerçekleştirilmiştir.

Kayın kaplama üretimi öncesinde tomruklar yaklaşık 120 saat süreyle 60 °C’de buharlama işlemine tabi tutulmuştur. Ardından Kayın kaplamalar benzer şekilde 15 m/dk. üretim hızına sahip milli kaplama soyma makinesinde 1,2 mm kalınlıkta soyulmuştur.

Soyma yöntemiyle üretilen kaplamalar otomatik kaplama ebatlama makinesinde (giyotin kesme) 55x55 cm ölçüsünde ebatlanarak Sancaklı Mobilya AŞ’de kullanılan endüstriyel kaplama kurutma fırınında 60 °C ± 2 °C sıcaklık ve %55 ± %5 bağıl nem şartlarında yaklaşık %8 denge rutubetine ulaşana kadar kurutulmuştur. Kaplama üretim aşamaları Şekil 3.1’de görülmektedir.



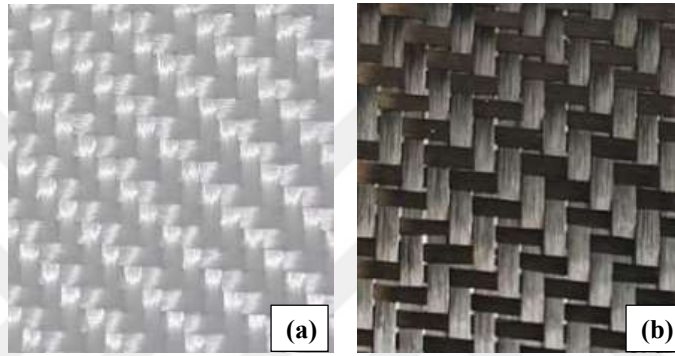
Şekil 3.1. Kaplama üretim aşamaları.

3.1.2. Güçlendirme Malzemesi

Literatürde ahşap veya ahşap esaslı ürünlerin güçlendirilmesi işlemlerinde; lif yapıları, yüksek dayanıma sahip olmaları, kolay temin edilebilir olmaları ve maliyet gibi sundukları çok sayıda avantaj nedeniyle polimer güçlendirme elemanlarından cam veya karbon elyafların sıklıkla tercih edildiği görülmektedir (Wei vd., 2013; Schober vd., 2015; Nadir vd. 2016; Song vd., 2018; Karaman ve Yıldırım, 2018). Bu elyaflardan elde edilen dokuma kumaşlar ise; GTAKP üretimi için uygun özelliklere sahip ve kolay uygulanabilir olması ayrıca dokuma özelliklerinin kazandırdığı ek dayanım özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir. Dokuma kumaşlardan twill (kazayağı) dokuma ile plain

dokuma karşılaştırıldığında; bu dokuma tekniğinde lifler farklı yönlendirilerek dokunması sonucu çok yönlü kuvvetlere karşı malzeme direncini olumlu yönde etkileyebilme potansiyeline sahip olması (Das ve Nizam, 2014) nedeniyle tercih edilmiştir.

GTAKP üretiminde, $200 \text{ g/m}^2 \pm \%5$ ağırlığındaki twill dokuma Cam ve Karbon elyaf kumaşlar kullanılmıştır. Cam elyaf (CE) dokuma kumaşlar Plasto Plastik Ltd. Şti, İstanbul, Karbon elyaf (KE) dokuma kumaşlar ise Dost Kimya End. Ham. San. ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul'dan temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan CE ve KE dokuma kumaşlar Şekil 3.2a ve b'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Twill dokuma (a) cam, (b) karbon elyaf.

Lif yapılı polimer kompozitler üretim özelliklerine bağlı olarak farklı mekanik özelliklere sahip olabilmektedir (Gay, 2015). Kullanılan güçlendirme elemanlarına ait tedarikçi firmalardan alınan teknik veriler Çizelge 3.4'de görülmektedir.

Çizelge 3.4. Cam ve Karbon elyaf dokuma kumaş teknik özellikleri.

	Cam Elyaf	Karbon Elyaf	Birim
Laminat Ağırlığı	200	200	g/m^2
Laminat Kalınlığı	0,15	0,327	Mm
Atkı Elyaf	124 / 100	T300 / 200	Tex
Çözümlü Elyaf	170 / 100	T300 / 200	Tex
Çekme direnci	3445	3950	MPa
Elastikiyet modülü	72.4	238	GPa

3.1.3. Tutkallar

GTAKP üretimi için kritik öneme sahip konulardan birisi ahşap kaplama plakaları ile cam/karbon fiber dokuma kumaşlar arasında yeterli ve iyi bir yapışma sağlanmasıdır. Bu amaçla ilk olarak farklı yapısal özelliklere sahip bu malzemeler için yapıştırıcı kullanılmak tutkal türü ve miktarının belirlenmesi yanı sıra üretimde tutkalın kullanımını etkileyen diğer faktörlerin de doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu faktörler hem

üretilebilirliği hem de üretilen malzemenin özelliklerini etkileyebilmektedir. Daha önce yapılan çok sayıda çalışmada tabakalı ahşap esaslı kompozitlerden LVL ve kontrplak malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde; ağaç türü, kalitesi, rutubet miktarı, yoğunluk, kaplama kalınlığı, katman sayısı, katman organizasyonu, tutkal türü ve miktarı, pres süresi ve sıcaklığı gibi çok sayıda faktörün etkileri olduğu bildirilmektedir (Tabarsa ve Chui, 1997; Daoui vd. 2011; Song vd. 2018; Bekhta vd. 2020).

Literatürden de görüldüğü üzere tabakalı ahşap esaslı kompozitler ve GTAKP'in mekanik özellikleri üzerinde, üretimde kullanılan malzemeler (ağaç malzeme, tutkal vb.) ve üretim faktörlerinin (sıcaklık, basınç, süre vb.) etkileri olduğu görülmektedir. Bu nedenle gerek üretimde kullanılan malzemeler gerekse üretim koşullarına ilişkin faktörler için GTAKP'in kalite özelliklerini en iyileyecek optimum faktör seviyelerinin (parametrelerin) belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla üretimde kullanılan ağaç türü ve güçlendirme malzemesi gibi temel bileşenlerin nasıl belirlendiği ilgili malzemeye ait başlık altında ifade edilmiştir. Üretimde kullanıma uygun olan tutkalın belirlenmesine ise karar vermek çok daha zordur. Çünkü hem kullanılacak tutkal yapısal olarak birbirinden farklı olan ağaç ve polimer kompozit dokumaları (CE ve KE) birbirine sağlıklı bir şekilde yapıştırılabilir olmalı hem de üretim koşullarına yönelik tutkal miktarı, pres süresi ve sıcaklığı gibi çok sayıda faktörün kullanıma yönelik sınır değerlerinin bilinmesi ya da belirlenmesi gerekmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde, literatür araştırması sonucu GTAKP üretiminde kullanılması muhtemel tutkal türlerinin üretime uygunluğu ve nihai deney tasarımıındaki üretim faktörlerine yönelik sınır değerleri belirlemek için yapılan deneysel çalışmalar ve deneme üretimleri hakkında kapsamlı bilgiler sunulmaktadır. Akabinde, çalışmada nihai olarak kullanılmasına karar verilen DTE 1200-1151 çift bileşenli epoksi ve poliüretan tutkalları hakkında bilgiler verilmektedir.

3.1.3.1. Tutkal Türü ve Miktarının Belirlenmesi

Çalışmada ilk olarak, daha önce verilen literatürden de görüleceği üzere kontrplak, LVL, yonga levha, lif levha vb. ahşap esaslı kompozit malzeme üretiminde hali hazırda kullanılan formaldehit reçine esaslı tutkal türleri olan Üre Formaldehit (ÜF), Fenol Formaldehit (FF) ve Melamin Formaldehit (MF) tutkallarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla özellikle LVL üretimine yönelik yapılmış çalışmalarda kullanılmış olan pres sıcaklığı, pres süresi, pres basıncı ve tutkal miktarı gibi üretim

faktörlerinin GTAKP üretimine uygun olup olmadığının belirlenmesi amacıyla denemeler yapılmıştır. Ayrıca CE ve KE kullanılarak üretilen farklı kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan tutkal türleri (epoksi ve poliüretan) için de benzer şekilde deneme çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen veriler ve gözlemler sonucu GTAKP üretiminde optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılacak deney tasarımı için faktörler ve faktör seviyeleri belirlenmiştir. Çalışmanın bu bölümünde farklı tutkal türleri için yapılan deneme çalışmaları hakkında detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

A. Üre Formaldehit (ÜF) ile Yapılan Çalışmalar

Deneme çalışmalarında ilk olarak gerek düşük maliyeti gerekse tabakalı ahşap esaslı kompozit levha üretiminde endüstride yaygın olarak kullanılması nedeniyle ÜF tutkalı ile deneme çalışmaları yapılmıştır. ÜF tutkalı İstanbul Tuzla Kimya Sanayicileri Organize Sanayi Bölgesinde (OSB) yer alan Gentaş Kimya Sanayi ve Ticaret Pazarlama AŞ' den temin edilmiştir. ÜF tutkalı su bazlı ve E1 sınıfı olup üretici firma verilene göre tutkalın kurlenme sıcaklığı 100 °C olarak bildirilmektedir. Deneme üretimi yapmak üzere faktör ve faktör seviyeleri, daha önce yapılan çalışmalar ve tutkal üretici tavsiyeleri dikkate alınarak belirlenmiştir. ÜF tutkalı ile deneme üretimi yapılan GTAKP malzemelerin yapışma dayanımlarını incelemek amacıyla Çizelge 3.5'de görülen faktör ve faktör seviyeleri (parametreler) kullanılarak üretimler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.5. ÜF tutkalı ile yapılan ön deneme çalışması faktörler ve faktör seviyeleri

AT	TT	PSC (°C)	PS (dk.)	PB (MPa)	TM (g/m ²)	GM (200g/m ²)
Kayın	ÜF	90, 110, 130	15, 20, 25	0,8; 1,2; 1,7	150, 200, 250	Cam Elyaf (CE)

*AT Ağaç Türü, *TT Tutkal Türü, *PSC Pres Sıcaklığı, *PS Pres Süresi, *PB Pres Basıncı,

*TM Tutkal Miktarı, *GM Güçlendirme Malzemesi

Gerek tabakalı ahşap kompozit levha, gerekse güçlendirilmiş tabakalı ahşap esaslı kompozit levha üretimlerine yönelik daha önce yapılan çalışmalarda kayın yaygın olarak kullanılan ağaç türleri arasında yer almaktadır. Ayrıca ülkemizde geniş yayılım alanına sahip ve kolay temin edilebilir bir tür olması nedeniyle deneme üretimlerinde 1,2 mm kalınlığında soyma yöntemiyle üretilmiş kayın kaplamalar kullanılmıştır. Üretim koşullarının standardize edilmesi amacıyla kullanılan kaplamalar 20 °C ± 2 °C sıcaklık ve %65 ± %5 bağıl nem şartlarında iklimlendirme kabini içinde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiştir. Deneme üretimlerindeki başarısız sonuçlar nedeniyle ortaya çıkacak kayıpların (zaman ve malzeme) azaltılması amacıyla deneme üretimlerine başarılı üretim

yapma ihtimali daha yüksek olan faktör seviye kombinasyonları ile başlanılmasına karar verilmiştir. Çalışmanın kritik öneme sahip başarı koşulu GM ile ahşap kaplama katmanlarının başarılı bir şekilde yapıştırılmasının sağlanmasıdır. Bu nedenle deneme üretimlerine CE dokuma kumaş kullanılarak en düşük faktör seviyeleri ile üretimin mümkün olup olmadığını belirlemek üzere deneme üretimlerine başlanılmıştır. Akabinde aynı koşullarda GM kullanılmadan kontrol gurubu örneklerinin üretimleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen üretimlerde 90 °C PSC’de üretilen kontrol gurubunda (güçlendirme katmanı olmayan) delaminasyon oluşmaksızın başarılı bir üretim sağlanırken, CE dokuma kullanılan GTAKP örneklerde delaminasyon ortaya çıktığı görülmüştür. Üretilen levhalar incelendiğinde (Şekil 3.3) CE ile ahşap kaplama katmanları arasında yapışma sağlanamadığı ve CE dokumanın ahşap kaplamalardan güç uygulamaya gerek duyulmaksızın kolayca ayrıldığı gözlenmiştir.



Şekil 3.3. ÜF tutkalı ile üretilmiş ve delamine olmuş panel.

ÜF tutkalı kullanılarak gerçekleştirilen deneme üretimlerinde GM kullanılmayan kontrol gurubu örneklerinin 110 ve 130 °C’de yapılan üretimlerinde de presleme işlemi tamamlandığında pres açılıp basınç düşürülünce katmanlardan yoğun bir şekilde basınçlı buhar çıkışı sonucu levhaların patlayarak delamine olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle deney tasarımındaki tüm koşullarda (farklı sıcaklık, süre, basınç ve tutkal miktarı) GTAKP deneme üretimlerine devam etmenin mümkün olmayacağı kanaatine varılarak ÜF tutkalı ile deneme işlemleri sonlandırılmıştır. Sonuç olarak GTAKP üretimi için mevcut haliyle ÜF tutkalın kulanıma uygun olmadığı belirlenmiştir. İleri çalışmalarda ÜF tutkal modifikasyonu ile GTAKP üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, tutkalın sunduğu maliyet ve ulaşılabilirlik avantajları nedeniyle faydalı olacaktır. Daha önce yapılan çalışmalarda polimer kompozit lifler ile ahşap katmanların yapıştırılmasında kullanıldığı bildirilen Fenol Formaldehit (FF) tutkalı kullanılarak deneme çalışmalarına devam edilmiştir.

B. Fenol Formaldehit (FF) tutkalı ile yapılan çalışmalar

Daha önce yapılan çalışmalarda, FF tutkalı kullanılarak başarılı güçlendirme çalışmaları yapıldığı görülmektedir. FF tutkalın çalışmada kullanılabilirliği ve üretime yönelik parametre sınırlarının belirlenmesi için deneme çalışmaları yapılmıştır. Denemelerde kullanmak üzere Gentaş Kimya Sanayi ve Ticaret Pazarlama AŞ' den tedarik edilen Alfen 74 sınıfı formaldehit reçinesi kullanılmıştır.

FF tutkalı ile yapılan deneme çalışmalarında, üretici firma tavsiyesi ve literatürden elde edilen bilgiler dikkate alınarak faktörler ve faktör seviyeleri belirlenmiştir. Çalışmada zaman ve malzeme tasarrufu sağlanması yanı sıra güncel bir deney tasarımı olması gibi birçok avantaj nedeniyle Taguchi yönteminin kullanılması düşünülmektedir. Taguchi yönteminde kullanılan ortogonal deney tasarımı, girdi faktörleri ve faktör seviyelerinin çıktı olarak değerlendirilen kalite göstergeleri ile ilişkilerini belirlemekte oldukça etkili bir yöntemdir. Fakat deney tasarımında belirtilen koşullarda (faktör ve faktör seviyeleri) sonuç değerlerin elde edilmiş olması yapılacak istatistik değerlendirmeler için büyük önem taşımaktadır. Yani belirtilen koşullarda başarılı üretim yapılması ve sonuç değerlerin ölçülmüş olması gerekmektedir. Başarısız üretimler olması durumunda deney tasarımının kullanılması ve sonuçların değerlendirilmesi mümkün olmamaktadır. FF tutkalı ile CE/KE kullanılarak başarılı bir şekilde güçlendirilmiş tabakalı ahşap esaslı kompozit üretimi yapıldığına yönelik literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu nedenle FF tutkalı ile yapılacak deneme üretimlerinde Taguchi yönteminin uygulanabilirliğinin test edilmesi de amaçlanmıştır. Deneme üretimi için belirlenen faktörler Çizelge 3.6'de görülmektedir.

Çizelge 3.6. FF tutkalı ile yapılan deneme üretimi faktörleri.

AT	TT	TM (g/m ²)	PS (dk.)	PSC (°C)	PB (MPa)	GM (200g/m ²)
Kayın	FF	150 200 250	15 20 25	120 140 160	0,8 1,2 1,7	CE

*AT Ağaç Türü, *TT Tutkal Türü, *TM Tutkal Miktarı, *PS Pres Süresi, *PSC Pres Sıcaklığı, *PB Pres Basıncı, *GM Güçlendirme Malzemesi,

Taguchi yönteminin uygulanabilirliğinin belirlenmesi amacıyla FF ile yapılan deneme üretimlerinde kullanılmasına karar verilmiştir. Çizelge 3.6'da belirtilen koşullar için tam

faktöriyel deney tasarımında $3^4 = 81$ (1AT x 1TT x 3TM x 3PS x 3PSC x 3PB x 1GM) adet farklı deneme yapılması gerekmektedir. Görüldüğü üzere 3 faktör bir seviyeli (1^3) ve dört faktör üç seviye (3^4) olarak planlanmıştır. Aynı faktör ve faktör düzeyleri için (1^3 x 3^4) Taguchi yöntemi kullanılması durumunda L_9 (3^4) ortogonal deney tasarımının uygun olduğu görülmüştür. Deney tasarımından da görüleceği üzere 3 faktör 1 seviyeli (AT, TT ve GM) olması nedeniyle Taguchi ortogonal dizininde alternatif oluşturmayacağı için ortogonal deney tasarımında gösterilmemiştir.

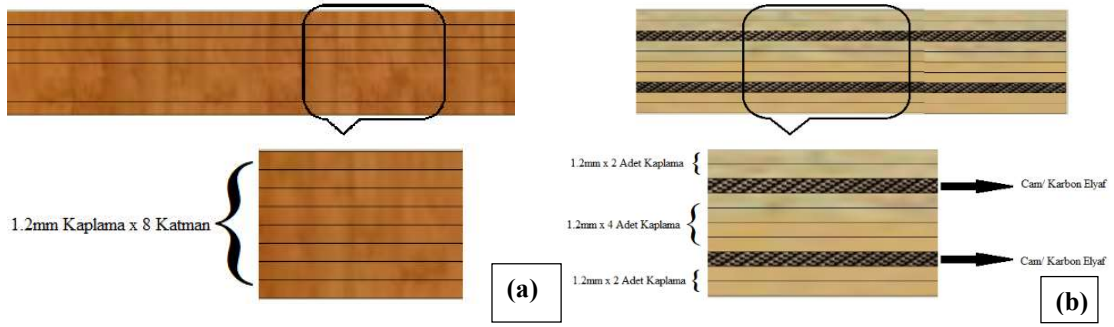
Çizelge 3.7’de minitab paket programına girilen veriler (TM, PS, PSC, PB) ile elde edilen L_9 (3^4) deney tasarımı görülmektedir.

Çizelge 3.7. FF Ön deneme için Taguchi metodu L_9 (3^4) deney tasarımı.

SN	TM (g/m ²)	PS (Dk.)	PSC (°C)	PB (MPa)
1	150	15	120	0,8
2	150	20	140	1,2
3	150	25	160	1,7
4	200	15	140	1,7
5	200	20	160	0,8
6	200	25	120	1,2
7	250	15	160	1,2
8	250	20	120	1,7
9	250	25	140	0,8

*TM Tutkal Miktarı, *PS Pres Süresi, *PSC Pres Sıcaklığı, *PB Pres Basıncı,

FF tutkalı ve kayın kaplamalar kullanılarak CE takviyeli GTAKP deneme üretimleri, Çizelge 3.7’de belirtilen ortogonal deney tasarımına uygun olarak yapılmıştır. Üretimde kullanılan kaplamalar $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ sıcaklık ve $\%65 \pm \%5$ bağıl nem şartlarında iklimlendirme kabiniinde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiştir. Üretim için gerekli kaplamalar iklimlendirme kabiniinden alınarak deney tasarımında belirtilen gramajlarda tutkal sürülmüş ve Şekil 3.4’de görülen biçimde 8 katman LVL’nin dış yüzeyden iki kaplama sonrasında 200 g/m^2 Twill dokuma CE güçlendirme elamanı serilmiştir. Güçlendirme malzemesi serilen katmanların her iki yüzeyine çalışma planında gösterilen şekilde ve miktarda tutkal uygulaması yapılmıştır.



Şekil 3.4. Kontrol (a) ve GTAKP (b) katman kombinasyonu.

Şekil 3.4’da belirtilen 1 ve 2 no’lu panellerin üretiminde herhangi bir problem olmamasına karşın 3 numaralı panel üretiminde cam elyaf bulunan katmanlar arasında delaminasyon (katmanlarda ayrılma) olduğu görülmüştür. Deney tasarımı uygulanmaya devam edilmiş ve mevcut değişkenler kullanılarak üretilen diğer panellerin de pres açıldığında delamine olduğu tespit edilmiştir. Ortaya çıkan katman ayrılması problemi nedeniyle Taguchi deney tasarımı ile sonuçların değerlendirilmesinin mümkün olmayacağı kanaatine varılmıştır.

Literatürde daha önce FF tutkalı kullanılarak yapılan başarılı çalışmalarda tüm koşullar yeteri kadar aydınlatılmadığı için bu tutkal ile başarılı üretim yapılabilirliğini ortaya koymak üzere denemelere devam edilmesine karar verilmiştir. Bu amaçla Çizelge 3.8’de görülen faktör seviyeleri kullanılarak deneme üretimlerine devam edilmiştir.

Çizelge 3.8. Üretimi gerçekleştirilen ve presin açılmasıyla delamine olan malzemeler.

SN	AT	TM (g/m ²)	PS (dk.)	PSC (°C)	PB (MPa)	GM
1	Kayın	250	25	120	1,7	Cam Elyaf
2	Kayın	250	20	140	0,8	Cam Elyaf
3	Kayın	200	15	140	1,7	Cam Elyaf
4	Kayın	200	25	120	1,7	Cam Elyaf
5	Kavak	200	15	140	1,7	Kontrol
6	Kavak	250	20	140	0,8	Kontrol

*SN Sıra Numarası, *AT Ağaç Türü, *TM Tutkal Miktarı, *PS Pres Süresi, *PSC Pres Sıcaklığı, *PB Pres Basıncı, *GM Güçlendirme Malzemesi

Çizelge 3.8’de belirtilen 1, 2 ve 3 numaralı örneklerde süre bitiminde pres açılmış ve basıncın kalkmasıyla delaminasyon meydana gelmiştir. 4, 5 ve 6 numaralı örneklerde ise

2. dakika ve 4. dakikada basınç altında oluşan buharın atılması amacıyla pres kısmen açılmış ve tekrar kapatılmıştır. Belirtilen süre bittiğinde pres açılmış ancak bu örneklerde de (patlama) delaminasyon gerçekleşmiştir.

Literatürde bu tip delaminasyon oluşumlarının ortaya çıkmasına yönelik farklı nedenlerden bahsedilmektedir. Kollman (1975), ağaç malzemedeki rutubet miktarı ne kadar yüksekse yapışma dayanımının o kadar düşük olacağını ve hatta delaminasyon oluşabileceğini vurgulamaktadır. Ayrıca aynı çalışmada bazı tutkal türleri için, ahşabın nem içeriğinin belirli sınırlar içinde kalması gerektiğini fenolik reçine esaslı tutkallar için bu rutubet miktarının %6'nın altına düşmemesi gerektiğini vurgulamaktadır (Kollman vd., 1975). Başka bir çalışmada ise kontrplak ve LVL'lerde delaminasyon oluşumunu sıcak pres uygulamasına uygun olmayan rutubet miktarı (RM) ve sıcaklık profili ilişkisi veya yetersiz pres süresi ya da her ikisi nedeniyle tutkalın zayıf kürlenmesi sonucu ortaya çıktığını vurgulanmaktadır (Huang, 2010). Tabakalı kompozitlerde sıcak pres kullanılarak üretim yapılması durumunda ağaç malzeme ve tutkal içerisinde bulunan rutubet hızla buhar fazına geçebilmektedir. Malzeme içerisinde oluşan basınçlı buharın presleme işlemi süresince atılması gerekmektedir. Frihart ve Hunt (2010)'a göre kompozitlerde kullanılan yapıştırıcının, uygulanan pres basıncı serbest bırakılırken panelin içindeki buhar basıncına dayanabilecek yeterli güce sahip olması gerekir. Yapıştırıcı yeterince güçlü değilse, iç buhar basıncı ürün içinde büyük bir tabakalaşmaya (darbeye) neden olacaktır. Kompozitin boyutu arttıkça buhar kaçıışı için daha az alan kalacak ve delaminasyon olasılığı artacaktır (Frihart ve Hunt, 2010). Bu denemelerde oluşan delaminasyonun ağaç malzeme ve tutkal içerisindeki rutubetin yüksek sıcaklık ile buhar fazına geçmesi sonucu oluşan buhar basıncından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ön deneme çalışmasında belirlenen koşullarda üretim gerçekleştirilemediğinden deney tasarımına uygun olarak üretim sürecinde yalnızca pres çevrim süresi tamamlandığında sürecin sonlandırılması işleminde değişikliğe gidilmiştir. Deneme üretimleri için Çizelge 3.7'de belirtilen koşullara uygun olarak presleme işlemi gerçekleştirilmiş ve delaminasyon oluşumunu önlemek amacıyla presin ısıtma sistemi deney tasarımında belirtilen süre sonunda kapatılarak pres oda sıcaklığına düşene kadar (yaklaşık 12-18 saat) beklemek suretiyle malzemenin soğuyarak içindeki buharın basınç altında iken uzaklaştırılması sağlanmıştır. Bu şekilde üretimler gerçekleştirilmiş ve delaminasyon (patlama) sorunu ortadan kaldırılmıştır. Akabinde deney numunelerinin yapışma dayanımlarını belirlemek üzere testler uygulanmıştır.

Görsel kontrollerde sorunsuz yapıştığı düşünülen panellerden malzeme mekanik özelliklerini belirlemek üzere deney örnekleri ilgili standartlara uygun olarak hazırlanmıştır. Yapışma Dayanımı (YD) deney örnekleri TS 3969 EN 314-1'e göre 150x25x10 mm, Eğilme Direnci (ED) ve Eğilmede Elastikiyet Modülü (EEM) deney örnekleri ise TS EN 310'a göre 250x50x10 mm ölçülerinde deney örnekleri hazırlanmıştır. Numuneler deneyler öncesinde $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ sıcaklık ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem şartlarında yaklaşık $\%12$ denge rutubetine sahip olacak şekilde değişmez ağırlığa ulaşıncaya kadar iklimlendirme kabini içinde şartlandırılmıştır.

Deney tasarımına göre üretilen tüm örneklerden öncelikle 1'er örnek (9 farklı örnek) için mekanik testler yapılmıştır. Testler Düzce Üniversitesi Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü mekanik test laboratuvarında bulunan 50 kN kapasiteli U-Test marka universal test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerden YD ve ED testleri yapılmaya başlanmış ancak testler esnasında GTAKP malzemelerin CE bulunan katmanlarında yeterli yapışmanın sağlanamadığı gözlenmiştir. Gerek YD gerekse ED'ni belirlemeye yönelik yapılan testlerde yetersiz yapışma kaynaklı tutarsız test sonuçlarının ortaya çıktığı görülmüştür.

FF tutkalı kullanılarak GTAKP (ilgi çalışmalarda güçlendirilmiş LVL olarak anılmaktadır) üretiminin anlatıldığı bazı çalışmalar incelenmiş ve güçlendirme katmanına (CE/KE dokuma kumaş) silan ajanları kullanılarak muamelede edildiğine vurgu yapılmakla beraber kullanılan silan ajanı ve uygulamaya yönelik kapsamlı bir metod tanımı (miktar, uygulama süreci ve yöntemi vb.) verilmediği görülmüştür.

Örneğin; Song vd. yaptıkları çalışmada kavak kaplama ve fenol formaldehit tutkalı ile güçlendirme malzemesi olarak E-Cam elyaf dokuma kumaş kullanıldığı, E-Cam elyaflar uygulamaya hazırlık aşamasında bir silan ajanı olan γ -aminopropyltriethoxysilane ile ağırlıkça $\%0,8$, $\%1,3$, $\%1,8$ oranında muamelede bulunulduğu belirtilmiştir. Ancak kullanılan silan ajanı türü ve uygulama miktarına yönelik bilgi verilmesine rağmen silan ajanının çeşidi, markası, CAS¹ numarası (*CAS: ABD Chemical Abstract Service tarafından kimyasal maddelere atanan sayısal bir adlandırmadır*) hakkında bir bilgi verilmemiştir (Song vd., 2018).

Bal (2014b) tarafından yapılan çalışmada, FF tutkalı kullanılarak, kavak kaplamalar ve plain dokuma CE kullanılarak güçlendirilmiş LVL üretimini ele aldığı çalışmada, yapışmada bağlayıcılığı artırmak amacıyla silan ajanı kullandığını bildirilmiştir. Fakat çalışmada kullanılan silan ajanının türü, özelliği, uygulama miktarı ve yöntemi hakkında

herhangi bir bilgiye yer verilmemiştir (Bal, 2014b).

FF tutkalı kullanılarak üretilen güçlendirilmiş LVL üretimi ile ilgili çalışmalarda silan ajanı kullanıldığı belirtilmekle beraber kullanılan silan ajanı hakkında yeterli bilgi verilmediği, uygulamaya yönelik kullanım miktarları ve uygulama yöntemleri gibi detay bilgilerin çalışmalarda yer almadığı görülmektedir. Bu literatür bilgileri ve yapılan ön deneme üretimleri sonucu FF tutkalı ile GM olarak kullanılan CE ile ahşap katmanları yapıştırmanın belirtilen koşullarda mümkün olmadığı kanaatine varılmıştır. Deneme çalışmalarına, hali hazırda endüstride ve akademik çalışmalarda farklı kompozit malzeme üretimlerinde kullanılan epoksi reçine esaslı tutkalların uygunluğunu belirlemek üzere devam edilmiştir. Bu amaçla piyasadan kolay temin edilebilecek epoksi reçine esaslı tutkallar, uygulanabilirlik, üretim sürecine uygunluğu ya da uygulanabilirliği gibi kriterler dikkate alınarak araştırmaya dahil edilmiştir.

C. KLM 474 Epoksi Esaslı Laminasyon reçinesi

KLM 474 epoksi esaslı laminasyon reçinesi Duratek Koruyucu Malzemeler San. ve Tic. AŞ. Kocaeli firmasından temin edilmiştir. Tedarikçi firma verilerine göre KLM 474 solventsiz epoksi esaslı laminasyon reçinesidir. Özellikle ahşap yapıştırılması için geliştirilmiştir. Ayrıca ahşap laminasyonunda, kontrplak ve CTP (cam elyaf takviyeli plastik) yapıştırılmasında da kullanılmaktadır. Bu bilgiler ışığında çalışmada kullanılabilirliğinin araştırılmasına karar verilmiştir.

KLM 474 epoksi esaslı laminasyon reçinesi temin edildikten sonra bu tutkalın yoğun kıvamlı olduğu bu nedenle ahşap malzeme yüzeyine eşit bir şekilde fırça veya rulo yardımıyla sürülmesinin mümkün olmadığı ya da zor olduğu görülmüştür. Malzeme yüzeyine yoğun kıvamı nedeniyle spatula ile yayılmak suretiyle uygulanabilmesinden dolayı bu çalışmanın ikincil amaçlarından birisi olan GTAKP malzemenin endüstriyel olarak seri imalatına uygun olmadığı görülmüş ve deneme üretimi yapılmamıştır. Denemelere DTE 1200-1151 çift bileşenli epoksi reçine esaslı tutkal ile devam edilmiştir.

D. DTE 1200 - DTS 1151 çift bileşenli epoksi reçine esaslı tutkal

DTE 1200 epoksi reçinesi ve DTS 1151 sertleştiricisi Duratek Koruyucu Malzemeler San. ve Tic. AŞ Kocaeli'den temin edilmiştir. Üretici firma tavsiyeleri doğrultusunda DTE 1200 çift bileşenli epoksi reçinesi ve DTS 1151 sertleştiricisi ağırlıkça 79/21 oranında karıştırılarak kullanılmıştır. Kullanılan reçine-sertleştirici karışımının teknik özellikleri Çizelge 3.9'da verilmektedir. Üretici tarafından epoksi reçinede kürlenmenin sertleştirici karışım oranına bağlı olarak oda sıcaklığında yaklaşık 24 saat içinde gerçekleştiği

bildirilmiştir.

Çizelge 3.9. Epoksi reçine esaslı yapıştırıcı teknik özellikleri.

Yoğunluk	1,10 ± 0,05 g/cm ³
Viskozite	300 ± 50 mPa-s
Karışım ömrü (23°C, 100 ml)	180 ± 20 dakika
Tavsiye edilen kürlenme zamanı	12 – 24 saat
Sertleştirici oranı (kütleye göre)	%21

Üretici teknik data sayfalarından ve tedarikçi firmadan elde edilen bilgilere göre DTE 1200 + DTS 1151 çift bileşenli epoksi tutkalı özellikle CE ve KE lamine kompozitlerin üretilmesi için uygundur ve bu tutkal ortam sıcaklığının artırılması ya da sıcaklık uygulanması ile çok daha hızlı kürlenebilmektedir. Daha önce epoksi reçine kullanılarak yapılan çalışmalarda sıcaklığa bağlı olarak kürlenme süresinin kayda değer derecede kısaltılabildiği vurgulanmaktadır. Czaderski ve arkadaşları epoksi reçinenin kürlenme koşullarını araştırdıkları çalışmalarında oda sıcaklığında saatler alan kürlenme sürecinin 30 dk. gibi kısa sayılabilecek bir süreye indirildiğini ve reçinenin mekanik özelliklerinde kayda değer bir olumsuz sonuç elde edilmediğini bildirmiştir (Czaderski vd., 2012). Literatürde benzer şekilde sıcaklık etkisiyle farklı tutkalların kürlenme süreçlerinin değiştiğini sadece yüksek değil düşük sıcaklıkların da tutkalların kürlenme süreçleri üzerinde ciddi etkilerinin olduğunu vurgulayan bazı çalışmalarda bulunmaktadır (Dodiuk ve Kenig 1994; Dutta ve Mosallam 2003).

Gerek CE ve KE ile kompozit malzeme üretiminde hali hazırda farklı üretim yöntemleri kullanılarak başarılı üretim yapılmasına olanak tanınması gerekse çalışmanın ikincil amaçlarından olan seri üretim için uygulanabilir üretim çevrim süresi elde edilmesi amacıyla sıcaklık uygulanarak kürlenmenin hızlandırılabilir olması nedeniyle çalışmada bu çift bileşenli epoksi reçine sisteminin denemelerde kullanılmasına karar verilmiştir.

Daha önce de belirtildiği üzere DTE 1200 + DTS 1151 çift bileşenli epoksi tutkalı üretici tavsiyeleri doğrultusunda sertleştirici/epoksi reçine oranı 21/79 olması durumunda normal şartlarda (23 °C) yaklaşık 24 saat içinde kürlenme süreci tamamlanmaktadır. Hâli hazırda seri üretim ile üretilen tabakalı ahşap esaslı kompozit levha üretim çevrim sürelerinin 5-10 dk. aralığında olduğu dikkate alınırsa çift bileşenli epoksi tutkalın oda sıcaklığındaki 24 saati bulan kürlenme süreci seri üretim için uygulanabilir olmadığı açık bir şekilde görülmektedir. Bu uzun kürlenme süreleri birim üretim çevrim süresi açısından büyük problem teşkil etmektedir. Daha önce yapılan çalışmalardan da

anlaşılabileceği üzere GTAKP üretiminde sıcak pres kullanımı ile bu sürenin oldukça kısaltılmasının mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Fakat bu sürenin olası sınırları ya da sıcaklığa bağlı olarak kullanılacak çift bileşenli epoksi tutkalın kürlenme dinamiklerinin tam olarak nasıl gelişeceği bilinmemektedir. Bu nedenle GTAKP üretim çevrim süresinin azaltılması için sıcak pres uygulamasında kullanılabilecek olası üretim parametreleri (sıcaklık, süre vb.) için sınır değerlerin bilinmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda bazı testler ve denemeler yapılarak deney tasarımında kullanılabilecek sınır değerlerin belirlenmesine çalışılmıştır.

Kullanılan tutkalın uygulama miktarı, sıcaklık ve süreye bağlı olarak yaklaşık kürlenme süresinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla 10x10 cm ölçülerindeki cam, ahşap ve CE-KE kumaşlar üzerine farklı miktarda tutkal (100, 120, 150, 200 g/m²) uygulanarak farklı fırın sıcaklıklarında (70, 90 ve 110 °C) ve sürelerdeki (10, 15, 20 ve 25 dk.) kürlenme özellikleri gözlenmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. a) Cam lamel üzerine, b) Cam/Karbon elyaf üzerine, c) Kavak kaplama üzerine tutkal uygulama ve fırında kurutma örnekleri.

Ayrıca, kullanılan epoksi esaslı reçine karışımının camsı geçiş sıcaklığı, ergime sıcaklığı, termal bozunma sıcaklığı ve kütle kaybı, Termogravimetri / Diferansiyel Termal Analizler (TGA/DTA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizleri yapılmak suretiyle incelenmiştir. Termogravimetri / Diferansiyel Termal Analizler (TGA/DTA), SHIMADZU marka DTG-60 H model eş zamanlı ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan epoksi reçine numunesinden yaklaşık 20 mL miktarındaki sertleştirici reçine karışımı pan'a alınarak termogravimetrik analiz (TGA) yöntemiyle azot akışı altında oda sıcaklığından 1000 °C'ye kadar, 10 °C/dk. ısıtma oranı uygulanmıştır. Ayrıca SHIMADZU marka DSC-60 model Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) cihazı kullanılarak, epoksi reçine numunesi oda sıcaklığından 600 °C'ye kadar 10 °C/dk. ısıtma oranı azot akışı altında olacak şekilde analizi yapılmıştır (Şekil 3.6 a ve b). Her iki analiz yöntemiyle reçinedeki bozulma ve kütle kayıpları kontrolü bir şekilde incelenmiştir.



(a) (b)
Şekil 3.6. TGA/DTA cihazı (a), DSC cihazı (b).

Tutkalların uygulandığı malzeme ile bağ kurması, tutkalın malzeme içine penetrasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle yapıştırılması istenilen malzemelerin sıvılar ile teması durumunda nasıl etkileşime girdiğinin belirlenmesi (hidrofilik ya da hidrofobik) malzemelerin yapıştırılması ile ilgili olarak önemli ipuçları vermektedir. Bir yüzeyin hidrofilik ya da hidrofobik özellikleri, su damlası ile yüzey arasındaki temas açısıyla belirlenir. Eğer temas açısı 90°'den küçükse yüzey hidrofiliktir, 90°'den büyükse hidrofobiktir. Temas açısı 150° ile 180° arasında ise yüzey süperhidrofobik olarak tanımlanmaktadır (Jung ve Bhushan, 2006; Kibar 2016). Güçlendirme amacıyla kullanılacak olan CE ve KE dokumaların hidrofilik (su emici) veya hidrofobik (su itici) özelliğini belirlemek amacıyla temas açısı testi uygulanmıştır. Bu test sonucunda elyaf malzemelerin kimen hidrofilik olduğu kanaatine varılmıştır. Temas açısı testi

ugulanmaya çalışıldığında CE/KE dokumaların gözenekli yapısı nedeniyle üzerine damlatılan su hızla malzemenin diğer yüzeyine geçmekte ve temas açısının ölçülmesine olanak tanımamaktadır. Bu nedenle CE/KE dokumaların bir yüzeyi bantlanarak damlatılan suyun malzemenin alt yüzeyine geçerek yayılması engellenmiş ve damla açısı ölçülmeye çalışılmıştır. CE/KE dokumalara ait damla açısı ölçümü Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7. Damla açısı yüzey görünümü.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde her iki elyaf dokuma kumaşında lif yapısına sahip olması, yüzeylerinin rijit olmaması yanı sıra geçirgen olması sebebi ile düzgün bir damla oluşumu sağlanamamıştır. Bu test neticesinde GM’nin yapıştırılmak istenilen alana sürülen tutkalı geçireceği ve bu nedenle tutkalın GM olarak kullanılan CE/KE dokumalarına tamamen nüfuz etmesinin elzem olduğu düşüncesi ortaya çıkmıştır. Bu sebeple GTAKP’nin elyaf konulan katmanlarında elyaf dokumaların temas ettiği her iki yüzeyinde tutkal sürülerek uygulama yapılması kararlaştırılmıştır.

Epoksi esaslı reçine ve sertleştirici karışımı için kürlenme periyodunun gözlemi ve termal analiz verileri sonucu, güçlendirilmiş tabakalı ahşap kompozit panellerin, sıcak pres kullanılarak üretiminde 3 farklı sıcaklık (100, 120, 140 °C), 3 farklı pres süresi (15, 20 ve 25 dk.) ve 3 farklı tutkal miktarı (100, 150 ve 200 g/m²) kullanılmasının deney tasarımı için kullanılabilir sınır değerler olduğu kanaatine varılmıştır.

Belirlenen üretim koşullarının en düşük faktör seviyeleri kullanılarak deneme üretimleri gerçekleştirilmiş ve üretimleri sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilebildiği görülmüştür. Bu nedenle çalışma nihai deney tasarımında DTE 1200+ DTS 1151 çift bileşenli epoksi reçine esaslı tutkalın kullanılmasına karar verilmiştir. Deneme çalışmalarına gerek daha önce yapılan polimer kompozit ve ahşap esaslı kompozit çalışmalarında sıkça kullanılması gerekse hali hazırda ağaç işleri mobilya endüstrisinde kullanılıyor olması nedeniyle poliüretan tutkalların GTAKP üretimine uygunluğunun araştırılması ile devam edilmesine karar verilmiştir.

E. Poliüretan tutkal (PU)

Poliüretan (PU) tutkallar endüstride farklı yapılarıdaki malzemelerin yapıştırılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Hali hazırda hem ağaç malzeme hem de polimer kompozitlerin yapıştırılmasında pratikte kullanıldığı çok sayıda kullanım alanı olduğu görülmektedir. Özellikle rutubete karşı dayanıklılık ve güçlü bir yapıştırma istenilen ahşap ve ahşap esaslı kompozit kullanılan ürünlerde (mutfaklar, tekne, yat vb. deniz araçları vb.) yaygın bir kullanım alanına sahip olması nedeniyle poliüretan tutkalın GTAKP üretimine uygun olup olmadığının değerlendirilmesine karar verilmiştir. PU tutkalların yaygın kullanım alanına sahip olması aynı zamanda kolay temin edilebilir bir tutkal olduğu kanaatini de pekiştirmektedir. Poliüretan tutkal olarak Selsil marka PU tutkal kullanılmıştır. PU tutkallar Sel Dış Ticaret ve Kimya Sanayi AŞ. İstanbul'dan tedarik edilmiştir. Tedarikçi firma tarafından, kullanılan Selsil PU tutkalın, nem kürlenmeli olarak oda sıcaklığında 6-12 saat aralığında tam kürlenmesini gerçekleştirdiği bildirilmiştir. Kürlenmenin hızlanması ortam ve malzeme rutubeti ile doğru orantılı bir şekilde artmakta veya azalmaktadır. Firma beyanına göre malzemede yeterli miktarda nem bulunmaması halinde yapıştırılmak istenen malzemeler arasında yapışmanın azaldığı veya olumsuz olarak etkilendiği belirtilmektedir.

Kullanılan poliüretan esaslı tutkalın teknik özellikleri Çizelge 3.10'da verilmektedir. Üretici tarafından tutkalın kürlenmesi oda sıcaklığında malzeme nem oranına bağlı olarak yaklaşık 6-12 saat aralığında gerçekleştiği bildirilmiştir.

Çizelge 3.10. Tek komponentli poliüretan esaslı tutkal teknik özellikleri.

Yoğunluk	1,13 ± 0,03 g/cm ³
Viskozite	6000 ± 1000 mPa-s
Yüzey kuruması	<20 dk. (23°C ve %50 RH)

Poliüretan tutkalın kullanım kararı verilirken, ön deneme sürecinde epoksi tutkal deneme süreçlerinde olduğu gibi faktör seviyelerinin en düşük olduğu üretim parametreleri (100 °C, 100 g/m², 15 dk.) ve güçlendirme katmanında CE kullanılarak GTAKP üretimi gerçekleştirilmiştir. Sorunsuz bir şekilde üretimi tamamlanan GTAKP'lerde ahşap ile CE arasında yeterli yapışmanın sağlanıp sağlanmadığını kontrol etmek üzere TS 3969 EN 314-1'e uygun olarak yapışma dayanımı (YD) testleri yapılmış ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu deneme üretimleri sonucu PU tutkalın da sıcak pres koşullarında GTAKP üretimi için uygun kullanılabilir olduğu kanaatine varılmıştır.

Deneme çalışmaları sonucu DTE 1200- DTS 1151 çift bileşenli epoksi reçine esaslı tutkal ve Selsil poliüretan tutkal kullanılarak gerçekleştirilen deneme üretimleri başarılı olmuştur. Deneme üretimleri, test ve gözlemler sonucu nihai deney tasarımı için kullanılacak faktörler ve bu faktörler için deney tasarımındaki sınır değerler (faktör seviyeleri) belirlenmiştir. Nihai deney tasarımında (Çizelge 3.11), 2 farklı ağaç türü-AT (Kavak, Kayın), 2 farklı tutkal türü-TT (epoksi, poliüretan), 3 farklı pres sıcaklığı-PSC (100, 120 ve 140 °C), 3 farklı pres süresi-PS (15, 20 ve 25 dk.), 3 farklı tutkal miktarı-TM (100, 150 ve 200 g/m²), 2 farklı güçlendirme malzemesi-GM (200 g/m² CE/KE twill dokuma kumaş) kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 3.11. GTAKP üretiminde kullanılan faktörler ve faktör seviyeleri.

AT	TT	PSC (°C)	PS (dk.)	TM (g/m ²)	GM*		
Kavak / Kayın	Epoksi / Poliüretan	100	15	100	CE	KE	K
				150	CE	KE	K
				200	CE	KE	K
			20	100	CE	KE	K
				150	CE	KE	K
				200	CE	KE	K
			25	100	CE	KE	K
				150	CE	KE	K
				200	CE	KE	K
		120	15	100	CE	KE	K
				150	CE	KE	K
				200	CE	KE	K
			20	100	CE	KE	K
				150	CE	KE	K
				200	CE	KE	K
			25	100	CE	KE	K
				150	CE	KE	K
				200	CE	KE	K
		140	15	100	CE	KE	K
				150	CE	KE	K
				200	CE	KE	K
			20	100	CE	KE	K
				150	CE	KE	K
				200	CE	KE	K
			25	100	CE	KE	K
				150	CE	KE	K
				200	CE	KE	K

*AT Ağaç Türü, *TT Tutkal Türü, *PSC Pres Sıcaklığı *PS Pres Süresi,*TM Tutkal Miktarı, *GM Güçlendirme Malzemesi,*CE Cam elyaf, *KE Karbon Elyaf, *K Kontrol Örneği

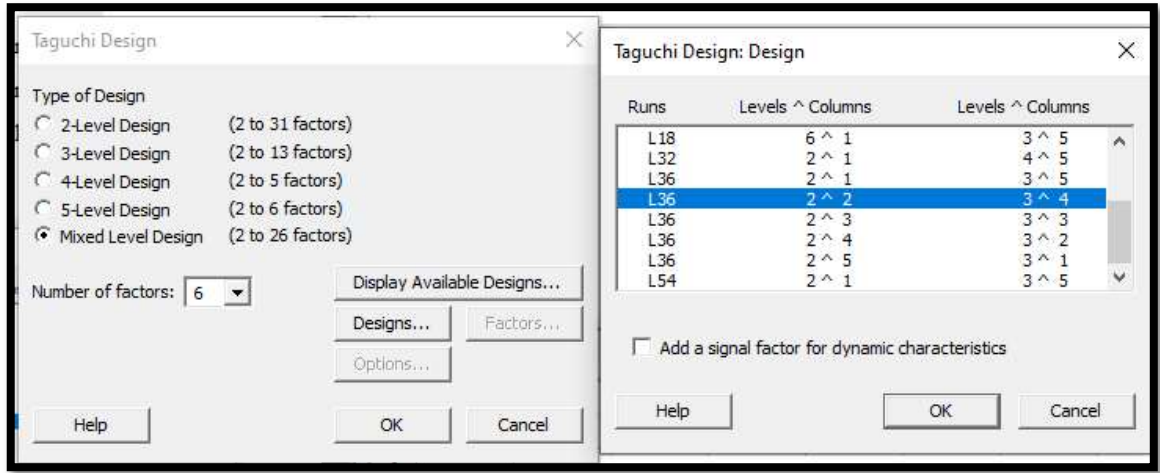
3.2. YÖNTEM

Bu bölümde GTAKP'nin üretimi için optimum üretim koşullarının belirlenebilmesi amacıyla kullanılan deney tasarımı, istatistik yöntem, malzemenin sonuç kalite göstergesi olan fiziksel ve mekanik özelliklerin tespiti amacıyla yapılan testler ve bu testlerin yapılmasına yönelik metodolojide takip edilen standartlara uygun olarak deneylerin yapılışı anlatılmaktadır.

3.2.1. Deney Tasarımı ve İstatistiksel Analiz

Tam faktöriyel deney tasarımlarında sonuç değer üzerinde faktörlerin etkilerinin belirlenmesi için her bir faktör düzeyi ve faktör sayısı kombinasyonu kadar deney yapılması ve bu deneylerin çok sayıda tekrar ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu durumda sonuç değer üzerinde etkili olan faktör sayısı ve bu faktörler için test edilecek faktör düzeyleri arttıkça gerçekleştirilecek deneyler çok maliyetli ve zaman alıcı olmaktadır. Örneğin, Çizelge 3.11. GTAKP üretiminde kullanılan faktörler ve faktör seviyeleri. Çizelge 3.11'de görülen faktör ve faktör seviyelerinin optimum pres parametrelerini belirlemek amacıyla 2 AT, 2 farklı TT, 3 farklı PSC, 3 PS, 3 farklı TM ve 2 GM + 1 K (kontrol) olmak üzere 3 farklı GM faktör seviyesinden oluşan deney tasarımında $2 \times 2 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 324$ farklı kombinasyonda 10 tekrerrür olacak şekilde her bir deney serisi için $324 \times 10 = 3240$ adet deney örneği üretilmesi gerekmektedir. Görüldüğü üzere faktör sayısı ve düzeyi arttıkça yapılması gereken deney sayısı çarpan etkisiyle artmaktadır.

Çalışmada kullanılan tutkal türü ile ahşap ve elyaf katmanları arasında yüksek yapışma direncinin elde edilmesi sonuç kalite göstergesi olarak ele alınmıştır. Daha az sayıda örnek ile zamandan ve deneysel üretim maliyetlerinden tasarruf edilmesi amacıyla güncel deney tasarımı uygulamalarından Taguchi yönteminin kullanılacaktır. Bu yöntem sayesinde seri üretimde kullanılabilecek optimum işlem parametreleri ve faktörlerin etki düzeylerinin belirlenmesi de amaçlanmaktadır. Uygun ortogonal dizinin belirlenmesi için göz önünde bulundurulmuş faktör ve faktör seviyeleri Minitab 18 istatistik analiz paket programında DOE (design of Experiment- Deney tasarımı) sekmesinde Şekil 3.8'de görüldüğü gibi veri girişleri yapılarak belirlenmektedir. Çalışma kapsamında göz önünde bulundurulmuş faktörler ve faktör seviyeleri için $L_{36} (2^2 \times 3^4)$ ortogonal deney tasarımının uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 3.8. Minitab programı Taguchi deney tasarımı seçim ekranı

Kullanılan L_{36} ($2^2 \times 3^4$) ortogonal deney tasarımı ve her bir panelin üretiminde kullanılacak faktör seviyeleri Çizelge 3.12’de görülmektedir. Üretim sürecinde çizelgedeki değişkenler önceden ayarlanarak üretim yapılacaktır ve üretilen her bir levhadan tüm deney örneklerinin elde edilmesi sağlanacaktır.

Çizelge 3.12. Deney Faktörleri ve L_{36} ($2^2 \times 3^4$) Ortogonal Dizin

TAGUCHI DENEY TASARIMI ($L_{36} - 2^2 * 3^4$)						
SN	AT	TT	TM (g/m ²)	PSC (°C)	PS (dk.)	GM
1	Kavak	Epoksi	100	100	15	Cam Elyaf
2	Kavak	Epoksi	150	120	20	Karbon Elyaf
3	Kavak	Epoksi	200	140	25	Kontrol
4	Kavak	Epoksi	100	100	15	Cam Elyaf
5	Kavak	Epoksi	150	120	20	Karbon Elyaf
6	Kavak	Epoksi	200	140	25	Kontrol
7	Kavak	Epoksi	100	120	15	Kontrol
8	Kavak	Epoksi	150	140	20	Cam Elyaf
9	Kavak	Epoksi	200	100	25	Karbon Elyaf
10	Kavak	Poliüretan	100	140	15	Karbon Elyaf
11	Kavak	Poliüretan	150	100	20	Kontrol
12	Kavak	Poliüretan	200	120	25	Cam Elyaf
13	Kavak	Poliüretan	100	140	20	Cam Elyaf
14	Kavak	Poliüretan	150	100	25	Karbon Elyaf
15	Kavak	Poliüretan	200	120	15	Kontrol
16	Kavak	Poliüretan	100	140	20	Karbon Elyaf
17	Kavak	Poliüretan	150	100	25	Kontrol
18	Kavak	Poliüretan	200	120	15	Cam Elyaf
19	Kayın	Epoksi	100	100	20	Kontrol

Çizelge 3.12. (Devamı)Deney Faktörleri ve L36 ($2^2 \times 3^4$) Ortogonal Dizin

20	Kayın	Epoksi	150	120	25	Cam Elyaf
21	Kayın	Epoksi	200	140	15	Karbon Elyaf
22	Kayın	Epoksi	100	120	20	Kontrol
23	Kayın	Epoksi	150	140	25	Cam Elyaf
24	Kayın	Epoksi	200	100	15	Karbon Elyaf
25	Kayın	Epoksi	100	120	25	Cam Elyaf
26	Kayın	Epoksi	150	140	15	Karbon Elyaf
27	Kayın	Epoksi	200	100	20	Kontrol
28	Kayın	Poliüretan	100	120	25	Karbon Elyaf
29	Kayın	Poliüretan	150	140	15	Kontrol
30	Kayın	Poliüretan	200	100	20	Cam Elyaf
31	Kayın	Poliüretan	100	140	25	Kontrol
32	Kayın	Poliüretan	150	100	15	Cam Elyaf
33	Kayın	Poliüretan	200	120	20	Karbon Elyaf
34	Kayın	Poliüretan	100	100	25	Karbon Elyaf
35	Kayın	Poliüretan	150	120	15	Kontrol
36	Kayın	Poliüretan	200	140	20	Cam Elyaf

*SN Sıra Numarası, *AT Ağaç Türü, *TT Tutkal Türü, *TM Tutkal Miktarı, *PSC Pres Sıcaklığı, *PS Pres Süresi, *GM Güçlendirme Malzemesi

Çizelge 3.12’de Taguchi karma deney tasarımı olarak belirlenen 36 adet deney numunesi GTAKP malzemenin sonuç kalite göstergesi olan fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla üretilmiştir. Elde edilen bulguların değerlendirilmesinde daha önce Taguchi yönteminin uygulanmasına yönelik sistematik yaklaşımda belirtilen (Bkz. Başlık 2.4) işlem basamakları harfiyen uygulanmak suretiyle GTAKP malzeme optimum üretim parametreleri ve kullanılan yöntemin geçerliği belirlenmiş olacaktır.

3.2.2. Üretim

Üretilen GTAKP katman kalınlığı yaklaşık 10 mm olması için 8 katman olarak planlanmıştır. Üretim koşullarının standardize edilmesi amacıyla deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılmadan önce tüm ahşap kaplamaların rutubet miktarlarının hava kurusu denge rutubetine getirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla üretim öncesi kullanılacak ahşap kaplama plakaları $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve $\%65 \pm \%5$ bağıl nem şartlarında iklimlendirme kabininde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiştir. Katmanların arasına CE/KE twil dokuma kumaş konularak güçlendirilmiş ve kontrol grubu (elyafsız) panel üretimi gerçekleştirilmiştir. Her katman arasına deney tasarımına uygun miktarda tutkal sürülmüş ve GM konulduğu kısımlarda (dıştan 2 kaplama tabakası içeride) her iki

ahşap yüzeyde tutkal uygulaması yapılmıştır. Tutkal sürme işlemi fırça kullanılarak tüm yüzeye eşit uygulama yapılmıştır. Tutkal sürülen tüm yüzeylerde ıslanma sağlandığı gözle kontrol edilmek suretiyle takip edilmiştir.

Tutkal miktarı yüzeye sürülürken 1/100 g duyarlıklı hassas terazi kullanılarak tutkal tartımı yapmak suretiyle uygulanan tutkal miktarının deney tasarımına uygun olarak kullanılması sağlanmıştır. Tutkal miktarının belirlenmesinde darası alınmış tutkal haznesinden eksiltme yöntemiyle ilgili ahşap kaplama m² si kadar eksiltme yapılmak suretiyle uygulanmıştır. Örnek tutkal hesaplama tablosu Çizelge 3.13’de verilmiştir.

Çizelge 3.13. Örnek tutkal uygulama miktarı çizelgesi

Kaplama plaka ebadı	m ²	Uygulanacak TM (g/m ²)	Uygulanan TM (g)
50 cm x 50 cm	0,250	100	25 ± %5
50 cm x 50 cm	0,250	150	37,5 ± %5
50 cm x 50 cm	0,250	200	50 ± %5

Tutkal uygulaması yapılan malzemeler üst üste konularak en fazla 5 dakika içerisinde prese hazır hale getirilmiştir. Hazır olan malzemeler ilgili faktör seviyesindeki sıcaklığa ulaşmış prese konularak 1 MPa basınç altında preslenmiş ve otomatik zaman sayacı ilgili faktör seviyesindeki süre bitiminde presin açılması için ayarlanmıştır. Malzeme üretim aşamaları Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3.9. GTAKP Üretim süreci.

Şekil 3.9’da görüldüğü üzere malzeme üretim parametrelerine göre süreç işletilmiştir. İlk olarak hassas terazide kullanılacak tutkal tartımı yapılmış (hazırlanan tutkal eksiltilerek gramaj hesaplanmıştır), sonrasında kaplama yüzeyine dökülen tutkal kıl fırça yardımıyla tüm yüzeye eşit şekilde dağıtılmış, üretim esnasında kullanılacak güçlendirme elemanının serileceği katmanın her iki yüzeyine gelen katmanlara tutkal sürümü yapılmıştır. Son olarak belirtilen süre çerçevesinde sıcak pres koşullarında presleme işlemi tamamlanmıştır. Presten çıkan malzemeler en az panel ebatı kadar büyüklükte rijit bir panel altına konularak ağırlık altında soğuması sağlanmıştır. Soğuyan panellerde burkulma, sehimlenme, kavlanma tespit edilmemiştir.

Paneller mekanik test yapılması amacıyla ilgili standart ölçülerine uygun biçimde daire testere makinesinde ebatlanmıştır. Deney örnekleri test öncesi iklimlendirme kabini içinde TS 2470 standardına uygun olarak iklimlendirmeye tabii tutulmuştur.

İklimlendirme kabini içinde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilen numuneler 10’ar adet alınarak en fazla 15 dk. içerisinde teste tabi tutulmuştur. Bu sayede ortamdan nem çekmesi ve rutubet değerinin değişmesi engellenmeye çalışılmıştır.

Deney örneklerinin üretimi, ebatlandırılması, deney öncesi iklimlendirme, denge rutubet miktarının belirlenmesi, yapışma testi, eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülünün belirlenmesi testi ve vida çekme testi Düzce Üniversitesi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği bölümü atölye ve laboratuvarlarında, dinamik eğilme direnci ise Düzce Üniversitesi Düzce Meslek Yüksekokulu Mobilya ve Dekorasyon programı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2.3. Panel Yoğunluğunun Belirlenmesi

Güçlendirilmiş ve kontrol grubu ahşap kompozit panellerin yoğunlukları TS EN 323 (1999) standardına uygun şekilde belirlenmiştir. LVL örnekleri 50 x 50 x kalınlık mm boyutlarında ve $\%(65 \pm 5)$ nisbi rutubet ve $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ sıcaklık şartlarında, değişmez ağırlığa ulaşınca kadar kondisyonlanmıştır. Numunelerin ağırlıkları $\pm 0,01$ g hassasiyetle belirlenmiş ve eşitlik 4.1’e göre hesaplanmıştır (TS EN 323).

$$p = \frac{m}{b_1 \times b_2 \times t} \times 10^6 \quad (4.1)$$

Förmülde,

p: Hacim ağırlığı (kg/m^3)

m: Deney parçasının kütlesi

b_1 , b_2 ve t Deney parçasının boyutları (mm) olarak ele alınmıştır.

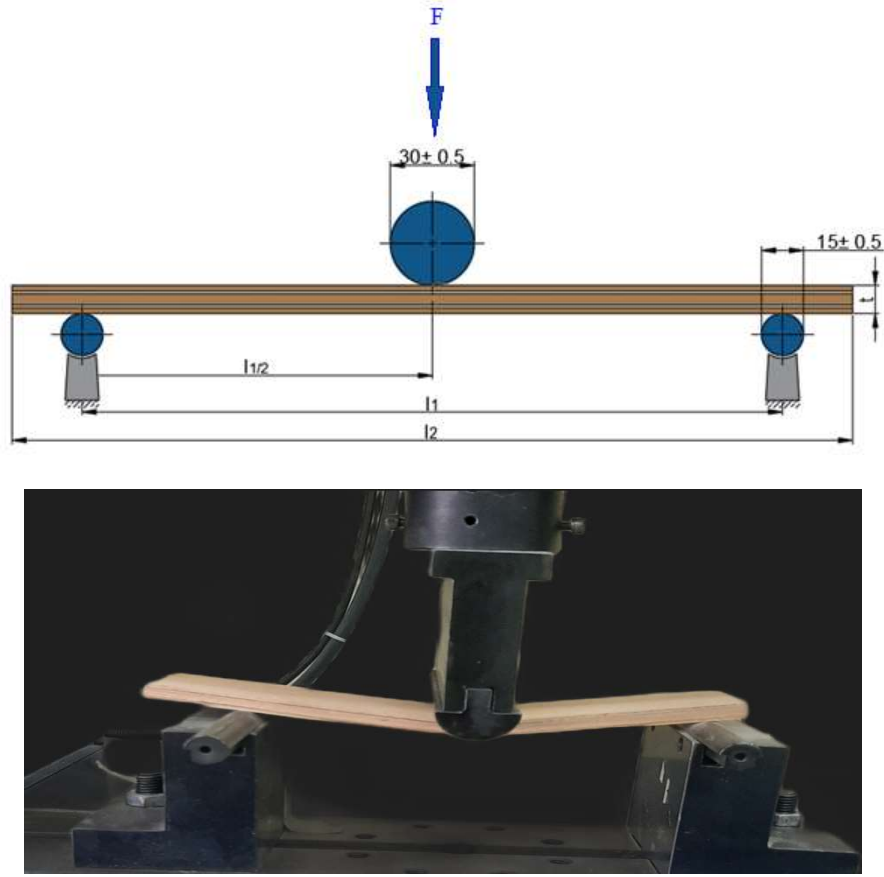
3.2.4. Eğilme Direnci ve Eğilmede Elastikiyet Modülü

Tutkal hattına dik eğilme direnci ağaç malzemenin lif doğrultusuna dik olarak uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir (Bozkurt ve Göker 1996) ve malzemelerin kullanım alanlarındaki servis verebilirlik performansı açısından belirlenmesi gereken önemli dayanım karakteristiklerinden birisidir. Eğilme direnci, bir elemanın maksimum yük taşıma kapasitesini yansıtır ve numune tarafından taşınan maksimum moment ile orantılıdır (Cai and Ross, 2010).

Bu çalışmada GTAKP üretim sürecinde etkili olan faktörlerin, üretilen malzemenin temel mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve en iyi sonuç değeri veren faktör seviyelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla en yüksek Eğilme Direncini (ED) elde etmemizi sağlayan faktör seviyelerini (optimum üretim parametreleri) belirlemek için Taguchi yöntemi kullanılmıştır.

Üretilen malzemelerin eğilme direnci TS EN 310 standardı esaslarına uygun olarak belirlenmiştir. Üretilen GTAKP malzemelerden elde edilen deney örnekleri 20 ± 2 °C sıcaklık ve $\%65\pm 5$ bağıl nem koşullarına ayarlanmış iklimlendirme kabini içinde değişmez ağırlığa ulaşıncaya kadar bekletilmiş ve deneylerden hemen önce rutubet değişimi oluşmadan ED deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden önce her bir parça ölçüsü dijital kumpas kullanılarak $\pm 0,01$ mm hassasiyetle ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Deneyler Düzce Üniversitesi Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan U-Test marka 50 kN kapasiteli universal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazının yükleme hızı, yükleme başladıktan yaklaşık $1,5\pm 0,5$ dakika içerisinde deney örneklerinde kırılma gerçekleşecek şekilde ayarlanmıştır. Deney sonunda kırılma anında uygulanan maksimum kuvvet Newton (N) cinsinden kaydedilmiş ve örneğin eğilme direnci Eşitlik 4.2, eğilmede elastikiyet modülü Eşitlik 4.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Üretilen panellerin eğilme direnci (ED) ve eğilmede elastikiyet modülü (EEM) testleri TS EN 310 (1999) standardına uygun şekilde yürütülmüştür. Şekil 3.10'da ED ve EEM test numunesi ve deney düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü test düzeneği

F: Kuvvet (N), t: Numune kalınlığı (mm), l1: Dayanaklar arası açıklık (20t±50 mm), l2: Deney numunesinin uzunluğu (l1+50 mm)

$$ED (N/mm^2) = \frac{3 \times f_{max} \times l_1}{2 \times b \times t^2} \quad (4.2)$$

$$EEM (N/mm^2) = \frac{l_1^3 (F_2 - F_1)}{4 b t^3 (a_2 - a_1)} \quad (4.3)$$

Burada;

f_{max} : Kırılma kuvveti (N)

F2 ve F1: Sırasıyla kırılma kuvvetinin yaklaşık olarak %40'ı ve %10'u

a2 ve a1: Yük sehim grafiğinde sırasıyla F2 ve F1'e karşılık gelen sehim miktarı.

l1: Dayanak noktaları arası mesafe (mm)

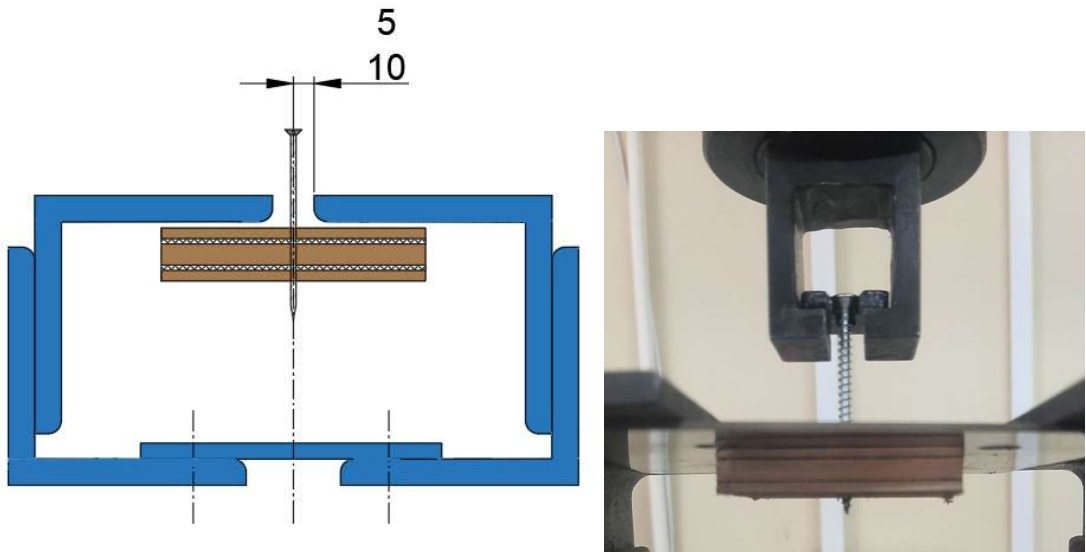
b: Deney parçasının genişliği (mm)

t: Deney parçasının kalınlığı (mm)

Eğilme direnci Eşitlik 4.2'ye eğilmede elastikiyet modülü Eşitlik 4.3'te verilen eşitliklere göre hesaplanmıştır

3.2.5. Vida Çekme Direnci

Vida çekme (VD) direncinin belirlenmesi amacıyla TS EN 13446'da belirtilen yönergelerle göre deney numunelerinin boyutları belirlenmiş ve her bir levhadan 50×50 mm boyutlarında en az 10'ar tane olmak üzere örnekler kullanılmıştır. Numunelere %65 ± 5 bağıl nem ve 20 ± 2 °C sıcaklıkta iklimlendirme dolabında, değişmez ağırlığa ulaşınca kadar kondisyonlanmış ve buradan çıkarıldıktan sonra en fazla 30 dk. içerisinde deneyi yapılmıştır. Deneylerde, vida anma boyutu 4,2 × 38 mm olan düşük karbon çelikli vidalar kullanılmıştır. Deneylerden önce her bir parça ölçüsü dijital kumpas kullanılarak ±0,01 mm hassasiyetle ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Deneyler Düzce Üniversitesi Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan U-Test marka universal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazının yükleme hızı, yükleme başladıktan yaklaşık 1,5±0,5 dakika içerisinde vida dişinin serbest kalacağı şekilde ayarlanmıştır. Deney sonunda vida dişinin malzemeden sıyrılma anında uygulanan maksimum kuvvet Newton (N) cinsinden kaydedilmiş ve örneğin VD Eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 3.11'de test numunesi ve deney düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Panel yüzeyinden vida çekme test düzeneği ve test yapılış düzeneği

Vida çekme direnci (Eşitlik 4.4) verilen eşitliklere göre hesaplanmıştır

$$f(N/mm^2) = \frac{F_{max}}{d \cdot l_p} \quad (4.4)$$

Burada;

f : Geri çekilmeye karşı gösterdiği direnç (N/mm²)

F_{max} : Deney uygulanan en yüksek yük (N)

d : Vida çapı (üretici firmanın belirlediği) (mm)

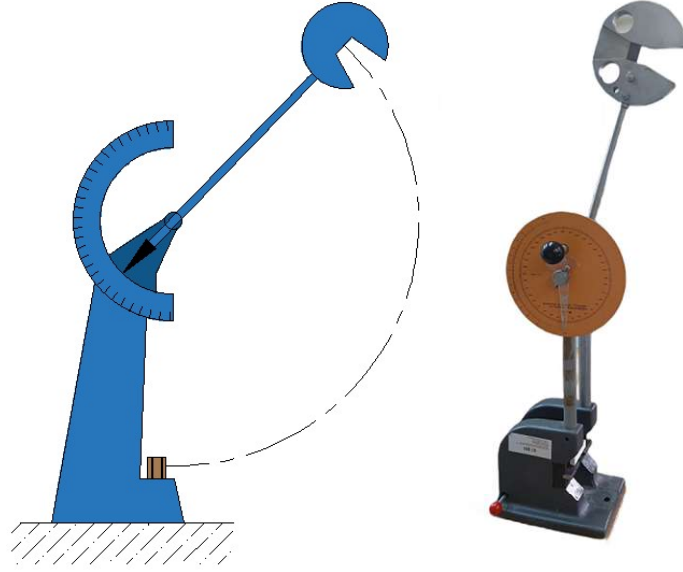
l_p : Bağlayıcı girme derinliği (mm)

3.2.6. Dinamik Eğilme Direnci

Üretilen panellerin dinamik eğilme direnci ölçümleri “Çarpmaya karşı eğilme mukavemetinin tayini” ISO 13061-10 standardına uygun şekilde yürütülmüştür. Örnekler tutkal katmanına dik kırılacak şekilde cihaza yerleştirilerek deneyler gerçekleştirildi.

Dinamik (Şok) eğilme direncinin tespiti, GTAKP malzemelerin kullanım alanlarındaki servis veribilirlik performansı açısından belirlenmesi gereken önemli dayanım karakteristiklerinden birisidir. Özellikle ani yüklere karşı dayanımın tespit edilmesi için kullanılan bir yöntem olup ahşap konstrüksiyona sahip yapılar, köprüler ve çatıların yük taşıyan kiriş, kolon gibi kısımlarında ani yüklere karşı kırılma eğilimi olan malzemenin kullanımının sakıncalı olabileceği, farklı odun türlerinin dinamik eğilme direnci üzerine yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir (Bektaş vd., 2002; Bal vd., 2012; Bal ve Bektaş, 2018).

Dinamik eğilme direncinin (DED) belirlenmesi amacıyla TS ISO 13061-10’da belirtilen yönergelere göre deney numunelerinin boyutları belirlenmiş ve her bir numuneden en az 10’ar tane olmak üzere örnekler kullanılmıştır. Numunelere 65 ± 5 bağıl nem ve 20 ± 2 °C sıcaklıkta iklimlendirme dolabında, değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar kondisyonlanmış ve buradan çıkarıldıktan sonra en fazla 30 dk. içerisinde deneyi yapılmıştır. Deneylerden önce her bir parça ölçüsü dijital kumpas kullanılarak $\pm 0,01$ mm hassasiyetle ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Deneyler Düzce Üniversitesi Düzce Meslek Yüksekokulu laboratuvarlarında bulunan 15 J kapasiteli darbe test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda malzemenin kırılma anında uygulanan maksimum kuvvet Joule (J) cinsinden kaydedilmiş ve örneğin kırılma anındaki karıştığı yük DED Eşitlik 4.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 3.12’de deney düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Çarpmaya karşı eğilme direnci deney düzeneği

Dinamik eğilme direnci (Eşitlik 4.5) aşağıda verilen eşitliklere göre hesaplanmıştır

$$Aw = \frac{1000 \times Q}{b \times h} \text{ kJ/mm}^2 \quad (4.5)$$

Burada;

Aw : Dinamik (şok) eğilme direnci (kJ/mm²)

Q : Kırılma için gereken enerji miktarı (J)

b : Test levha genişliği (mm)

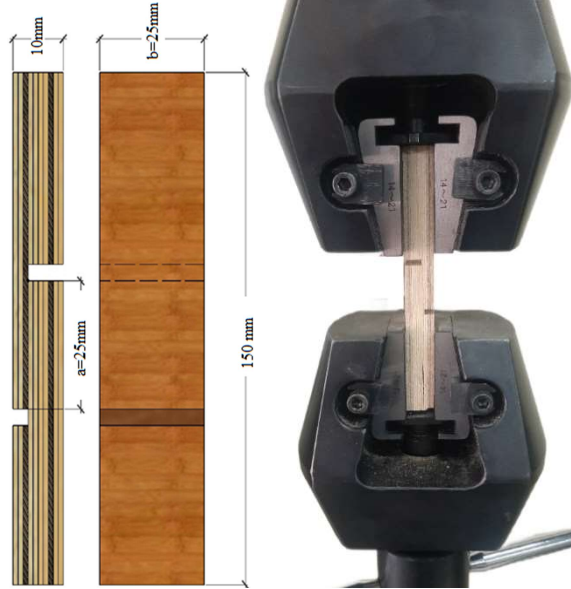
h : Test levha kalınlığı (mm)

3.2.7. Yapışma Direnci

Güçlendirilmiş LVL üretimini delaminasyon olmaksızın gerçekleştirmek ve ilgili standartta (TS EN 314-1) belirtildiği şekliyle teste tabi tutularak yapışma direncinin ölçümü malzemenin kullanım alanındaki performansı için önemli bir kriterdir. Yapışma direnci özellikle farklı malzemelerin bir arada tutunabilmesinin ölçümü, malzemelerin kullanım alanlarındaki servis verebilirlik performansı ve diğer mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi açısından gereken önemli dayanım karakteristiklerinden birisidir.

YD testleri TS 3969 EN 314-1 (1998) Kontrplak Kaplanmış-Yapışma Kalitesi Bölüm 1: Deney Metotları standardına uygun şekilde teste tabi tutulmuştur. Standartta belirtilen ölçülerin görsel şekli ve test düzeneği Şekil 3.13'de görülmektedir.

Yapışma direncinin (YD) belirlenmesi amacıyla TS 3969 EN 314-1’de belirtilen yönergelerle göre deney numunelerinin boyutları belirlenmiş ve her bir numuneden en az 10’ar tane olmak üzere örnekler kullanılmıştır. Numunelere 65 ± 5 bağıl nem ve 20 ± 2 °C sıcaklıkta iklimlendirme dolabında, değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar kondisyonlanmış ve buradan çıkarıldıktan sonra en fazla 30 dk. içerisinde deneyi yapılmıştır. Deneylerden önce her bir parça ölçüsü dijital kumpas kullanılarak $\pm 0,01$ mm hassasiyetle ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Test cihazının yükleme hızı, yükleme başladıktan yaklaşık $1 \pm 0,5$ dakika içerisinde deney örneklerinde kırılma gerçekleşecek şekilde ayarlanmıştır. Deney sonunda kırılma anında uygulanan maksimum kuvvet Newton (N) cinsinden kaydedilmiş ve numunelerin yapışma direnci Eşitlik 4.6 kullanılarak hesaplanmıştır



Şekil 3.13. Yapışma direnci test numune ölçüleri ve test düzeneği.

Yapışma direnci (Eşitlik 4.6) aşağıda verilen eşitliklere göre hesaplanmıştır

$$yd = \frac{F}{a \times b} \quad (N/mm^2) \quad (4.6)$$

Burada; yd: yapışma direnci (N/mm^2),

F: kopma kuvveti (N),

a: kesme yüzey uzunluğu (mm),

b: kesme yüzey genişliğini (mm) ifade etmektedir.

3.2.8. Detaylı Görüntüleme

Alınan görüntülerin net ve düzgün olmasını sağlamak amacıyla detaylı görüntüleme işlemi öncesi, örneklerin yüzey düzeltme işlemi Leica SM 2010r model mikrotom cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14. Mikrotom cihazı.

Ahşap ile güçlendirme malzemesini yapıştırma amacıyla kullanılan tutkalların katman arasında yayılım ve penetrasyon özelliklerini incelemek amacıyla Düzce üniversitesi bilimsel araştırma laboratuvarında bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmesi yapılmıştır. Yüksek çözünürlükte görüntü almak için görüntüleme öncesinde Sputter Kaplama Cihazı ile numune yüzeyi Au veya Au/Pd target ile yüzey kaplaması yapılarak iletken hale getirilmiştir.



Şekil 3.15. Sputter Kaplama Cihazı (a) Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (b).

SEM cihazında görüntü almak üzere malzeme yüzeyine yapılan kaplamadan ötürü tutkal hattından sağlıklı değerlendirme yapılmasını sağlayabilecek özellikte görüntü alınamamıştır. Alınan görüntülerde tutkal hattı, ağaç malzeme hücre boşlukları ve tutkalın ağaç malzemeye penetrasyonu hakkında değerlendirme yapılması mümkün olmamıştır. Bu sebeple Dino-Lite Universal marka 220x oranında büyütme ve 5 Mp kamera çözünürlüğüne sahip dijital mikroskop kullanılarak kesit görüntüleri incelenmiştir.



Şekil 3.16. Dino-Lite Universal dijital mikroskop.

Mikroskop görüntülerinin daha anlaşılır olması ve GTAKP malzeme katmanlarındaki ve ağaç malzemeye penetre olan tutkalın daha belirgin ayırt edilmesini sağlamak amacıyla görüntüleme için hazırlanan örnekler safranin sıfır boyar maddesi ile örnekler boyanmıştır. Ayrıca hücre boşlukları ve düzgün görüntü alınmasını sağlamak üzere deney örneklerinin görüntü alınacak yüzeyleri mikrotom kullanılarak ince bir film katmanı sıyırılmak suretiyle düzeltilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında faktör ve faktör seviyeleri olarak 2 farklı ağaç türü (AT - Kavak ve Kayın), 2 farklı tutkal türü (TT - Epoksi ve Poliüretan), 2 farklı güçlendirme malzemesi (GM - Cam veya Karbon elyaf dokuma kumaş), 3 farklı tutkal miktarı (TM - 100, 150, 200 g/m²), 3 farklı pres süresi (PS - 15, 20, 25 dk.) ve 3 farklı pres sıcaklığı (PSC - 100, 120, 140 °C) kullanılarak Güçlendirilmiş Tabakalı Ahşap Kompozit Panel (GTAKP) numuneleri üretilmiştir. Ayrıca kontrol grubu olarak kullanılacak örneklerde diğer parametreler sabit olmak üzere güçlendirme malzemesi kullanılmaksızın levhalar üretilmiştir. Bu levhaların mekanik özelliklerini belirlemek üzere tutkal hattına dik eğilme direnci (ED), eğilmede elastikiyet modülü (EEM), vida tutma direnci (VD), dinamik eğilme direnci (DED) ve yapışma direnci (YD) belirlenmiştir. Yapılan literatür araştırması ve ön deneme çalışmaları sonucu GTAKP üretimi için dikkate alınan faktörlerin, üretilen malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etki düzeyleri ve optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Göz önünde bulundurulan faktör ve faktör seviyelerine göre L₃₆ (2² x 3⁴) ortogonal dizisi kullanılarak deney parçalarının üretim koşulları oluşturulmuştur. Deney sonuçları Minitab® 18 paket programı kullanılarak değerlendirilmiştir.

Üretilen GTAKP için göz önünde bulundurulan mekanik özellikler (ED, EEM, VD, DED, YD) malzemelerin kullanım yerlerindeki performansı açısından değerlendirildiğinde maksimum olması arzu edilen özelliklerdir. Bu amaçla elde edilen ölçüm değerleri için tüm mekanik özelliklerde maksimum değerleri veren faktör seviyeleri (AT, TT, TM, PS, PSC ve GM) belirlenmiştir.

Ayrıca her bir faktörün, malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ve etki düzeylerini belirlemek amacıyla %5 hata payı (%95 güven düzeyi) ile varyans analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu varyans analizleri ile sonuç değerler (mekanik özellikler) üzerinde etkili olan her bir faktörün ilgili mekanik özellik üzerindeki katkı düzeyleri de belirlenmiştir. Son olarak Taguchi yöntemi ile belirlenen optimum üretim parametrelerine uygun olarak üretilmiş malzemenin deney tasarımında yer alıp almadığı kontrol edilmiştir. Yapılan kontrolde belirlenen optimum üretim parametrelerine sahip olmayan örnek grupları için doğrulama deneyleri yapılmıştır. Elde edilen Sinyal/Gürültü (S/G) oranları kullanılarak Taguchi tahmin modeli oluşturulmuş ve sonuç değerlere yönelik %95 güven düzeyinde güven aralığı tahminleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen doğrulama

deney verileri ile tahmin değerleri karşılaştırılarak Taguchi yönteminin uygulama başarısı analiz edilmiştir.

Bu alışma kapsamında göz önünde bulundurulan faktör ve faktör seviyelerine göre belirlenen Taguchi L_{36} ($2^2 \times 3^4$) ortogonal dizisi kullanılarak 36 farklı deney tasarlanmış ve çalışma güvenirliğini artırmak üzere her bir deney 10 tekerrür olacak şekilde deney numuneleri hazırlanmak suretiyle testler gerçekleştirilmiştir. Böylece değerlendirmeye alınan her bir mekanik özellik için $36 \times 10 = 360$ adet deney yapılmıştır. Değerlendirilen 5 farklı mekanik özellik için optimum işlem parametrelerinin belirlenmesi amacıyla toplam $360 \times 5 = 1800$ adet deney gerçekleştirilmiştir. GTAKP'in kullanım yerlerinde mekanik özelliklerinin maksimum (en büyük) olması istenmektedir. Bu nedenle optimum faktör seviyelerinin belirlenmesi için analizlerde elde edilen sinyal-gürültü (S/G) oranları ve ortalama grafikleri için en büyük en iyi karakteristik kullanılmıştır.

Bu bölümde, üretilen GTAKP için performans göstergesi olan her bir mekanik özelliğe yönelik elde edilen bulgular yukarıda kısaca bahsedilen değerlendirme sistematiğine göre ayrı ayrı analiz edilmiş ve daha önce yapılmış benzer çalışmalardan elde edilen bilgiler ile karşılaştırılmak suretiyle değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuç olarak her bir mekanik özelliğe ait sonuç değerler üzerinde etkili olan faktörler için parametre optimizasyonu yapılmış ve ilgili mekanik özelliği en iyileyen optimum parametreler (faktör seviyeleri) belirlenmiştir.

4.1. FİZİKSEL ÖZELLİKLER

4.1.1. Yoğunluk lm

Üretilen malzemelerin yoğunlukları (d) TS EN 323 (1999) standardına uygun şekilde belirlenmiş ve kg/m^3 birimine çevrilmiştir. Çizelge 4.1'de GTAKP rnekler için $50 \times 50 \times$ kalınlık mm boyutlarında ve $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $\%65 \pm \%5$ bağıl nem koşullarında iklimlendirilmiş numunelerin ağırlıkları $\pm 0,01 \text{ g}$ hassasiyetle belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Deney örnekleri yoğunluk değerleri.

SN	AT	TT	TM g/m ²	PS dk	PSC °C	GM	d $\bar{X}$ kg/m ³	d S/G Oranı (dB)	SS
1	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	560,00	54,92	23,22
2	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	573,60	54,73	11,52
3	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	526,67	54,16	27,22
4	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	554,67	54,92	22,73
5	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	520,00	54,73	14,59
6	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	495,60	54,16	9,12
7	Kavak	Epoksi	100	15	120	Kontrol	495,12	53,89	12,65
8	Kavak	Epoksi	150	20	140	Cam	525,00	54,40	22,16
9	Kavak	Epoksi	200	25	100	Karbon	637,33	56,09	27,66
10	Kavak	Poliüretan	100	15	140	Karbon	537,33	54,60	9,21
11	Kavak	Poliüretan	150	20	100	Kontrol	548,00	54,78	22,87
12	Kavak	Poliüretan	200	25	120	Cam	580,00	55,27	7,69
13	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Cam	568,00	55,09	8,29
14	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Karbon	550,67	54,82	23,05
15	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Kontrol	524,00	54,39	10,20
16	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Karbon	572,00	55,15	6,32
17	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Kontrol	481,67	53,65	10,81
18	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Cam	632,00	56,01	17,75
19	Kayın	Epoksi	100	20	100	Kontrol	568,67	55,10	15,90
20	Kayın	Epoksi	150	25	120	Cam	649,67	56,25	28,79
21	Kayın	Epoksi	200	15	140	Karbon	685,33	56,72	27,57
22	Kayın	Epoksi	100	20	120	Kontrol	582,33	55,30	17,11
23	Kayın	Epoksi	150	25	140	Cam	658,00	56,36	6,07
24	Kayın	Epoksi	200	15	100	Karbon	737,67	57,36	5,73
25	Kayın	Epoksi	100	25	120	Cam	637,60	56,09	14,59
26	Kayın	Epoksi	150	15	140	Karbon	662,00	56,42	15,75
27	Kayın	Epoksi	200	20	100	Kontrol	664,67	56,45	37,67
28	Kayın	Poliüretan	100	25	120	Karbon	661,20	56,41	9,21
29	Kayın	Poliüretan	150	15	140	Kontrol	622,67	55,89	17,57
30	Kayın	Poliüretan	200	20	100	Cam	722,00	57,17	24,10
31	Kayın	Poliüretan	100	25	140	Kontrol	618,33	55,82	10,81
32	Kayın	Poliüretan	150	15	100	Cam	693,33	56,82	11,45
33	Kayın	Poliüretan	200	20	120	Karbon	736,00	57,34	33,82
34	Kayın	Poliüretan	100	25	100	Karbon	658,33	56,37	13,15
35	Kayın	Poliüretan	150	15	120	Kontrol	631,33	56,01	12,46
36	Kayın	Poliüretan	200	20	140	Cam	734,40	57,32	16,64

*SN Sıra Numarası, *AT Ağaç Türü, *TT Tutkal Türü, *TM Tutkal Miktarı, *PS Pres Süresi, *PSC Pres Sıcaklığı,

*GM Güçlendirme Malzemesi, * $\bar{X}$ Aritmetik ortalama, S/G Sinyal Gürültü oranı, SS Standart Sapma

Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere yoğunluğu en yüksek malzeme ($737,67 \text{ kg/m}^3$), 200 gr/m^2 epoksi tutkalı, 100°C pres sıcaklığı, 15 dk. pres süresi, karbon elyaf güçlendirme malzemesi ve Kayın kaplamalar kullanılarak üretilen örneklerden elde edilmiştir. En düşük yoğunluğa sahip malzeme ise ($481,67 \text{ kg/m}^3$), 150 gr/m^2 poliüretan tutkalı, 100°C pres sıcaklığı, 25 dk. pres süresi ile güçlendirme malzemesi kullanılmamış (kontrol) Kavak örneklerden üretilmiş deney numunelerinden elde edilmiştir. Güçlendirme malzemesi (200 g/m^2 cam / karbon elyaf) kullanılmış panellerin yoğunluklarında kontrol grubu örneklerine göre ortalama %11 oranında bir artış olduğu görülmektedir.

Üretilen malzemenin performans karakteristikleri üzerinde etkili olan faktörlerinin (AT, TT, GM, TM, PS ve PSC) optimum seviyeleri ve yoğunluk üzerinde bu faktörler arasında en etkili olanın belirlenmesi amacıyla Taguchi yöntemi kullanılarak oluşturulan S/G yanıt tablosu kullanılmaktadır. Bu tablodaki ortalama olarak en büyük S/G değeri kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi göstermektedir. Yoğunluk üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini gösteren S/G oranları yanıt tablosu Çizelge 4.2’de görülmektedir.

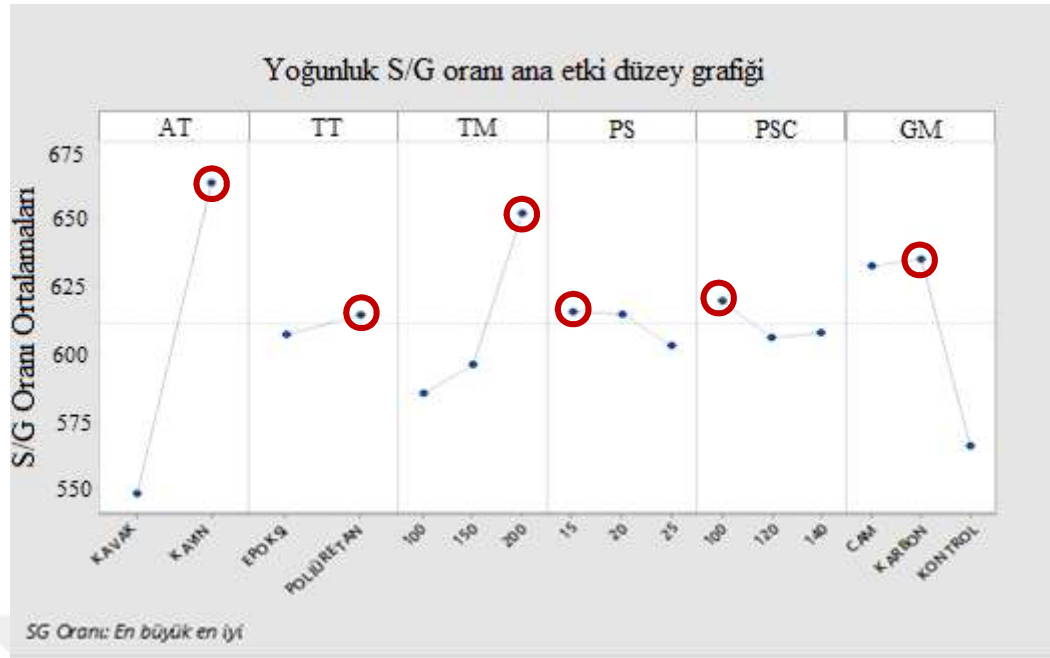
Çizelge 4.2. Yoğunluk için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.

Seviye	AT	TT	TM	PS	PSC	GM
1	54,8	55,62	55,34	55,73	55,77	55,97
2	56,4	55,72	55,47	55,71	55,61	56,00
3			56,21	55,57	55,63	55,04
Delta	1,6	0,1	0,87	0,16	0,17	0,96
Önem Sırası	1	6	3	5	4	2

Şekil 4.2 incelendiğinde üretilen GTAKP malzemenin yoğunluğu üzerinde en fazla etkiye sahip olan faktörün kullanılan ağaç türü (AT) olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla güçlendirme malzemesi (GM), tutkal miktarı (TM), pres sıcaklığı (PSC), pres süresi (PS) ve tutkal türü (TT) izlemektedir.

Her faktör düzeyinin performans karakteristiği üzerindeki etkileri S/G oranları kullanılarak analiz edilmektedir. S/G oranlarında maksimum değerleri veren faktör seviye kombinasyonları, değerlendirilen performans karakteristiği için optimum parametreleri ifade etmektedir.

Yoğunluk için kontrol faktörlerinin optimum seviyelerini gösteren S/G oranı ana etki düzey grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Yoğunluk için S/G oranları ana etki düzey grafiği.

Şekil 4.1 incelendiğinde AT faktörünün ikinci seviyesi (Kayın), TT faktörünün ikinci seviyesi (PU), TM faktörünün üçüncü seviyesi 200 g/m², PS faktörünün birinci seviyesi (15 dk.), PSC faktörünün birinci seviyesi (100 °C) ve GM faktörünün ikinci seviyesinin (karbon elyaf dokuma kumaş) optimum yoğunluğa ait üretim parametresi olduğu görülmektedir.

Varyans analizi (ANOVA), deney tasarımında kullanılan kontrol faktörlerinin (bağımsız değişkenler) birbirleri ile etkileşimlerini ve performans karakteristiği olarak belirlenen sonuç değerler (bağımlı değişken) üzerindeki etki düzeyleri ve faktör seviyeleri arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı ($p \leq 0,05$) olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Taguchi vd., 2005; Başol, 2019).

Yoğunluk için yapılan ANOVA sonuçları %95 güven düzeyinde ($p \leq 0,05$) değerlendirilmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Yoğunluk değerleri ANOVA sonuçları.

Kontrol Faktörü	Serbestlik Derecesi (df)	Katkı Düzeyi (%)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F-Değeri	P-Değeri ($p \leq 0,05$)
AT	1	61,64	115812	115812	237,5	0,000*
TT	1	1,68	3161	3161	6,48	0,017*
TM	2	11,27	21171	10585	21,71	0,000*
PS	2	0,86	1623	812	1,66	0,210
PSC	2	0,79	1487	744	1,53	0,237
GM	2	17,27	32440	16220	33,26	0,000*
Hata	25	6,49	12191	488		
Toplam	35	100,00	187885			

* $p \leq 0,05$: anlamlı, $p > 0,05$: anlamsız

Çizelge 4.3 incelendiğinde, AT, TT, TM ve GM'nin yoğunluk üzerinde istatistiksel olarak anlamlı fark oluşturduğu ($p \leq 0,05$) ve etki düzeylerinin sırasıyla %61,6; %1,68; %11,27 ve %17,27 olduğu görülmektedir. Diğer kontrol faktörleri olan PS ve PSC faktörlerinin ise yoğunluk üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadıkları belirlenmiştir. Tüm kontrol faktörleri dikkate alındığında ise yoğunluk üzerindeki toplam etki düzeylerinin yaklaşık %94 oranında olduğunu ve çalışmada kullanılan kontrol faktörlerinin %6,49 oranında yoğunluk üzerindeki etkileri açıklamadığını ya da kontrol edilemeyen çevresel faktörler tarafından etkilendiği söylenebilir. Bu sonuç, Taguchi yöntemi ile elde edilen S/G yanıt tablosu (Çizelge 4.2) ve S/G oranı için ana etki düzey grafiği (Şekil 4.1) ile elde edilen parametre optimizasyonunu desteklemektedir.

Kayın ile üretilen örneklerin yoğunluğu Kavak ile üretilenlere göre %20,65 daha yüksek elde edildiği görülmektedir (yoğunluğu en yüksek numune ile en düşük numune arasında %54'e yakın bir yoğunluk farkı vardır). Kullanılan Kayın ağacının yoğunluğu Kavak ağacına göre yaklaşık %70 daha fazladır. Pres basıncı sabit kalmak koşuluyla üretilen numunelerin belirli oranlarda yoğunlaştığı (numune kalınlıkları yaklaşık 8,5 mm kadar düştüğü görülmüştür) bu sebeple yoğunluk farkının azaldığı düşünülmektedir.

TT'nün yoğunluk üzerindeki etkisi incelendiğinde PU ile yapıştırılmış örneklerin EPX ile yapıştırılmış örneklerle göre daha yüksek (%3,1) yoğunlukta oldukları görülmüştür. Kullanılan her iki tutkal türü içinde firma bilgileri esas alındığında PU tutkalın yoğunluğu

EPX'e göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Deney tasarımı belirlenen şekilde yapışma yüzeylerine her ne kadar eşit miktarlarda tutkal uygulanmış olsa da, kullanılan EPX tutkalının viskozitesinin (300 mPa-s) PU'a göre (6000 mPa-s) çok daha düşük olmasına bağlı olarak pres basıncı altında malzemeden taşma yaptığı görülmüştür. PU kullanılan malzemelerin yoğunluğunun EPX kullanılanlara göre yüksek çıkmasının temel sebebinin bu olduğu düşünülmektedir.

TM'na bağlı olarak yoğunluk artışının gerçekleştiği Şekil 4.1 de net olarak görülmektedir. Kullanılan TM arttıkça malzeme yoğunluğunun artması beklenen bir durumdur. Ayrıca TM'ndaki artış %100 (100g/m²'den 200g/m²) olmasına karşın yaklaşık %10 luk bir yoğunluk artışı oluşması malzemelerin pres basıncı altında kısmen yoğunlaşması, fazla tutkalın basınç altında panel kenarlarından taşmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

GM'nin yoğunluk artışındaki etkisi incelendiğinde, kullanılan güçlendirme malzemeleri ve tutkalların yoğunluklarının kaplamaların yoğunluğuna göre daha yüksek olması ve GM bulunan katmanlarda her iki yüzeyde tutkal uygulanması yoğunluktaki artışa yol açtığı düşünülmektedir.

4.2. MEKANİK TEST SONUÇLARI

4.2.1. Tutkal Hattına Dik Eğilme Direnci ve Parametre Optimizasyonu

Çizelge 4.4'de çalışmaya esas L₃₆ ortogonal dizini kullanılarak üretilen malzemelerden hazırlanmış deney numunelerinden elde edilen ortalama ED ve bu değerler kullanılarak hesaplanan S/G oranları ve standart sapmaları verilmiştir.

Çizelge 4.4. ED aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.

SN	AT	TT	TM g/m ²	PS dk	PSC °C	GM	ED $\bar{X}$ (N/mm ²)	ED S/G Oranı (dB)	SS
1	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	128,74	42,99	27,19
2	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	154,08	43,45	14,02
3	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	119,21	41,94	12,87
4	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	157,95	42,99	12,40
5	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	144,07	43,45	13,73
6	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	131,80	41,94	7,70
7	Kavak	Epoksi	100	15	120	Kontrol	107,16	40,60	6,56

Çizelge 4.4 (Devam). ED aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.

8	Kavak	Epoksi	150	20	140	Cam	153,64	43,73	15,74
9	Kavak	Epoksi	200	25	100	Karbon	167,84	44,50	9,86
10	Kavak	Poliüretan	100	15	140	Karbon	132,30	42,43	11,28
11	Kavak	Poliüretan	150	20	100	Kontrol	120,77	41,64	5,02
12	Kavak	Poliüretan	200	25	120	Cam	136,45	42,70	8,86
13	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Cam	167,88	44,50	30,56
14	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Karbon	127,03	42,08	3,69
15	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Kontrol	110,50	40,87	5,26
16	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Karbon	134,86	42,60	14,27
17	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Kontrol	120,64	41,63	6,62
18	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Cam	122,63	41,77	14,32
19	Kayın	Epoksi	100	20	100	Kontrol	132,42	42,44	18,91
20	Kayın	Epoksi	150	25	120	Cam	182,44	45,22	12,14
21	Kayın	Epoksi	200	15	140	Karbon	193,91	45,75	9,29
22	Kayın	Epoksi	100	20	120	Kontrol	142,76	43,09	4,18
23	Kayın	Epoksi	150	25	140	Cam	172,03	44,71	11,87
24	Kayın	Epoksi	200	15	100	Karbon	218,22	46,78	7,60
25	Kayın	Epoksi	100	25	120	Cam	163,46	44,27	8,23
26	Kayın	Epoksi	150	15	140	Karbon	192,26	45,68	15,68
27	Kayın	Epoksi	200	20	100	Kontrol	137,06	42,74	7,44
28	Kayın	Poliüretan	100	25	120	Karbon	162,54	44,22	9,80
29	Kayın	Poliüretan	150	15	140	Kontrol	144,16	43,18	16,73
30	Kayın	Poliüretan	200	20	100	Cam	166,75	44,44	8,65
31	Kayın	Poliüretan	100	25	140	Kontrol	136,84	42,72	5,10
32	Kayın	Poliüretan	150	15	100	Cam	150,98	43,58	5,46
33	Kayın	Poliüretan	200	20	120	Karbon	176,21	44,92	8,92
34	Kayın	Poliüretan	100	25	100	Karbon	151,97	43,64	10,10
35	Kayın	Poliüretan	150	15	120	Kontrol	143,68	43,15	4,88
36	Kayın	Poliüretan	200	20	140	Cam	159,87	44,08	9,71

*SN Sıra Numarası, *AT Ağaç Türü, *TT Tutkal Türü, *TM Tutkal Miktarı, *PS Pres Süresi, *PSC Pres Sıcaklığı, *GM Güçlendirme Malzemesi, * $\bar{X}$ Aritmetik ortalama, S/G Sinyal Gürültü oranı, SS Standart Sapma

Çizelge 4.4’den görüldüğü üzere en yüksek ED (218,22 N/mm²), 200 gr/m² epoksi tutkalı, 100 °C pres sıcaklığı, 15 dk pres süresi, karbon elyaf güçlendirme malzemesi ve Kayın kaplamalar kullanılarak üretilen örneklerden elde edilmiştir. En düşük ED ise (107,16 N/mm²), 100 gr/m² epoksi tutkalı, 120 °C pres sıcaklığı, 15 dk. pres süresi ile güçlendirme malzemesi kullanılmamış (kontrol) Kavak örneklerden üretilmiş deney numunelerinden elde edilmiştir.

ED üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini gösteren S/G oranları yanıt tablosu Çizelge 4.5'te görülmektedir.

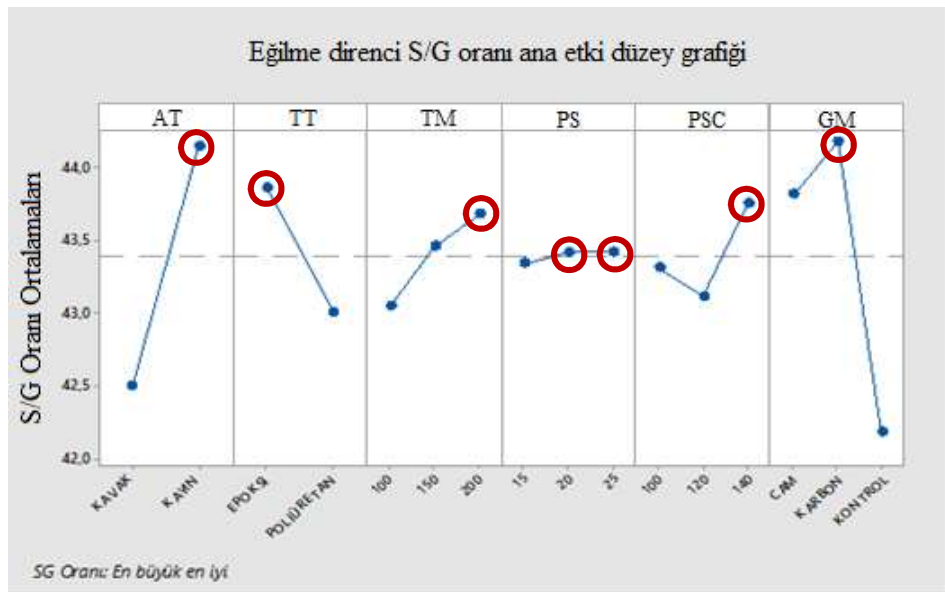
Çizelge 4.5. ED için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.

Seviye	AT	TT	TM	PS	PSC	GM
1	42,50	43,86	43,05	43,34	43,31	43,82
2	44,14	43,01	43,46	43,42	43,11	44,19
3			43,68	43,42	43,76	42,18
Delta	1,65	0,85	0,63	0,08	0,64	2,0
Önem Sırası	2	3	5	6	4	1

Çizelge 4.5 incelendiğinde üretilen GTAKP malzemenin ED üzerinde en fazla etkiye sahip olan faktörün kullanılan güçlendirme malzemesi (GM) olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla ağaç türü (AT), tutkal türü (TT), pres sıcaklığı (PSC), tutkal miktarı (TM) ve pres süresi (PS) izlemektedir.

Malzemenin kullanım yerinde ED'nin olabildiğince yüksek olması arzu edilmektedir. Bu nedenle S/G oranları için ana etki düzey grafiğinde en yüksek değere sahip faktör seviyeleri o parametreye ait optimum seviyeyi göstermektedir.

ED için kontrol faktörlerinin optimum seviyelerini gösteren S/G oranı ana etki düzey grafiği Şekil 4.2'de verilmiştir



Şekil 4.2. ED için S/G oranları ana etki düzey grafiği.

Şekil 4.2 incelendiğinde AT faktörünün ikinci seviyesi (Kayın), TT faktörünün birinci seviyesi (Epoksi), TM faktörünün üçüncü seviyesi 200 g/m², PS faktörünün ikinci ve üçüncü seviyeleri (20-25 dk.), PSC faktörünün üçüncü seviyesi (140 °C) ve GM faktörünün ikinci seviyesinin (karbon elyaf dokuma kumaş) optimum üretim parametre kombinasyonunu oluşturduğu görülmektedir. PS için 20 ve 25 dk. üretilen örnekler aynı S/G yanıt oranına sahip olması nedeniyle üretim süreci için herhangi birinin tercih edilebileceği söylenebilir. Bu nedenle PS'nin kısa olmasına bağlı olarak enerji tüketim miktarındaki ve dolayısı ile enerji maliyetlerdeki düşüşün yanısıra birim zamanda üretilen ürün miktarındaki artış dikkate alındığında 20 dk. PS kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

ED için yapılan ANOVA sonuçları %95 güven düzeyinde ($p \leq 0,05$) değerlendirilmiştir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. ED için ANOVA sonuçları.

Kontrol Faktörü	Serbestlik Derecesi (df)	Katkı Düzeyi (%)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F-Değeri	P-Değeri ($p \leq 0,05$)
AT	1	30,78	6669,83	6669,83	34,79	0,001*
TT	1	6,96	1507,7	1507,70	7,86	0,010*
TM	2	3,02	653,75	326,88	1,71	0,202
PS	2	0,18	38,61	19,30	0,10	0,905
PSC	2	1,69	366,62	183,31	0,96	0,398
GM	2	35,25	7638,07	3819,04	19,92	0,001*
Hata	25	22,12	4792,58	191,7		
Toplam	35	100,00	21667,16			

* $p \leq 0,05$: anlamlı, $p > 0,05$: anlamsız

Çizelge 4.6 incelendiğinde, GM, AT ve TT'nün ED üzerinde istatistiksel olarak anlamlı fark oluşturduğu ($p \leq 0,05$) ve etki düzeylerinin sırasıyla %35,25, %30,78 ve %6,96 olduğu görülmektedir. Diğer kontrol faktörleri olan TM, PS ve PSC faktörlerinin ise ED üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadıkları belirlenmiştir. Tüm kontrol faktörleri dikkate alındığında ise ED üzerindeki toplam etki düzeylerinin yaklaşık %78 oranında olduğunu ve çalışmada kullanılan kontrol faktörlerinin yaklaşık %22 oranında ED üzerindeki etkileri açıklamadığını ya da kontrol edilemeyen çevresel faktörler tarafından etkilendiği söylenebilir. Bu sonuç, Taguchi yöntemi ile elde edilen S/G yanıt

tablosu (Çizelge 4.5) ve S/G oranı için ana etki düzey grafiği (Şekil 4.2) ile elde edilen parametre optimizasyonunu desteklemektedir.

Çalışma kapsamında belirlenen L_{36} ($2^2 \times 3^4$) deney tasarımında, elde edilen optimum parametre kombinasyonlarının yer almadığı görülmüştür. Bu nedenle ED için belirlenen optimum parametrelere göre yeniden malzeme üretimi yapılarak Taguchi yönteminde belirtildiği şekilde doğrulama deneyi için ED sonuçları değerlendirilmek suretiyle Taguchi optimizasyonunun geçerliliği doğrulanmıştır. Yapılan doğrulama deneyinde, iki farklı pres süresi (20 – 25 dk.) optimum parametre kombinasyonu içerisinde yer almaktadır. Tutkalların sıcaklık altında kürlenme, kütle kaybı ve yapısal deformasyonlarını incelemek üzere yapılan TGA analizlerinde sıcaklık ve maruz kalınan süre arttıkça tutkallarda yapısal deformasyonların arttığını göstermektedir. Bu nedenle yapılan doğrulama deneyinde olası en kötü sonucu görmek suretiyle Taguchi optimizasyonunu test etmek amacıyla 25 dk. pres süresi doğrulama deneyi optimum parametre kombinasyonunda tercih edilmiştir. Yapılan doğrulama deney sonuçları yöntemin son basamağı olarak bölüm sonunda değerlendirilmiştir.

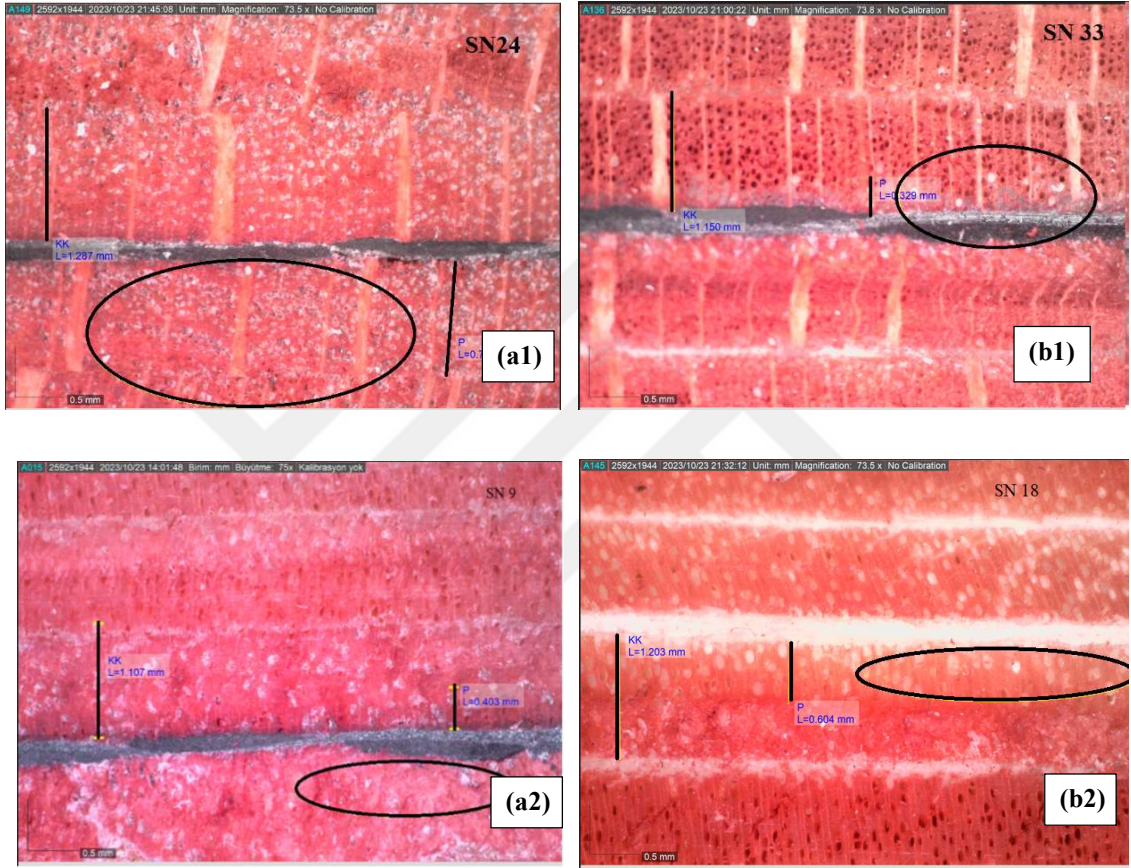
AT'nin ED üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, Kayın ile üretilmiş numunelerdeki ED'nin Kavak ile üretilen numunelere göre yaklaşık %20 daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun ağaç malzemenin yoğunluğuna paralel olarak mekanik özelliklerinin artmasından (Bodig ve Jayne, 1993; Perçin vd. 2009; Missanjo ve Matsumura, 2016; Bal ve Bektaş, 2018) kaynaklandığı düşünülmektedir.

TT'nin ED üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, epoksi esaslı tutkal'ın poliüretan esaslı tutkala göre yaklaşık %9 daha iyi eğilme direnci oluşturduğu görülmektedir. Yıldırım vd. (2021) yaptıkları çalışmada, PVAc, PU ve EPX tutkalları ile cam elyaf kullanarak ürettikleri Kavak LVL'lerde en yüksek mekanik özelliklerin (ED ve EEM) epoksi tutkal ile üretilen numunelerde elde ettiklerini bildirmişlerdir. 200 g/m² ağırlığındaki cam elyaf ile güçlendirilmiş malzemenin ED için en yüksek değerler PVAc-D4 – 62,48 N/mm², PU-D4 – 56,80 N/mm², EPX – 79,98 N/mm² olarak elde edilmiştir. EPX tutkal kullanılarak üretilen güçlendirilmiş malzemenin ED'nin PU tutkalına göre %41 oranında yüksek olduğu raporlanmıştır. Bu sonucun yapılan GTAKP üretimi sonucu elde edilen TT parametresinin ED üzerindeki etkileri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Tabakalı malzemelerin mekanik özelliklerine etki eden bir diğer önemli faktör ise tutkal penetrasyonudur (Kamle ve Lee 2007; Chang vd. 2017). Malzemenin ED'nin, tutkalın

yapıştırılan malzemeye penetrasyonuna bağlı olarak arttığı bildirilmektedir (Song vd. 2018).

Uygulanan tutkalın malzeme içerisine nüfuzunun (penetrasyon) belirlenmesi amacıyla Dino-Lite Universal marka 220x oranında büyütme kapasitesine ve 5 Mp kamera çözünürlüğüne sahip dijital mikroskop kullanılarak kesit görüntüleri incelenmiştir Şekil 4.3.



Şekil 4.3. 200g/m² Tutkal ile üretilmiş Kayın (a1) EPX (b1) PU ve Kavak (a2) EPX (b2) örneklerde tutkal penetrasyonu.

Şekil 4.3 incelendiğinde üretilen GTAKP’lerde EPX ve PU tutkal ile üretilen örnekler kıyaslandığında, EPX’in kaplamalara daha fazla nüfuz ettiği görülmektedir. GTAKP’lerin ED değerlendirildiğinde EPX kullanılarak üretilen numunelerin PU ile üretilen örneklerle göre daha yüksek olmasının EPX’in kaplamalara daha fazla nüfuz etmesiyle ilişkili olduğu söylenebilir. TM’nın ED üzerine istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmamasına ($p>0,05$) rağmen (Çizelge 4.6) ED için S/G oranları ana etki düzey grafiği (Şekil 4.2) incelendiğinde TM arttıkça ED’nin arttığı görülmektedir.

Song vd. (2018) yaptıkları çalışmada, fiber modifikasyonu, tutkal uygulama yöntemi,

sıcak pres parametreleri ve üretimde kullanılan farklı katman kombinasyonlarının FF tutkalı kullanarak ürettikleri güçlendirilmiş LVL'nin fiziksel ve mekaniksel özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada farklı tutkal miktarları (260, 330, 400 g/m²) kullanımının numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Sonuç olarak tutkal miktarının 260 g/m²'den 330 g/m²'ye artması ile eğilme direncinde yaklaşık %8 oranında artış ortaya çıktığını bildirmiştir. Tutkal miktarının 330 g/m²'den 400 g/m²'ye artması sonucu malzemenin mekanik özelliklerinin azda olsa olumsuz etkilendiğini (eğilme direnci için yaklaşık % 0,16) ve bu olumsuzluğun kullanılan tutkal miktarının artmasına bağlı olarak artan rutubet miktarından kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Ayrıca Fang vd. (2013) yaptıkları çalışmada tutkal miktarının artmasının kaplama çatlaklarını ve mikro düzey boşlukları iyi derecede dolduracağını ve bu sayede daha yüksek sıvı penetrasyonu sağlanacağını bildirmişlerdir.

Daha önce yapılmış çalışmalarda da görüleceği üzere, tutkal kullanım miktarındaki artışın genellikle üretilen malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkiye neden olduğu görülmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen TM artışına bağlı olarak ED'nin artmasının daha önceki çalışmalarla uyumlu olduğu söylenebilir.

Kontrol faktörlerinin eğilme direnci üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, en önemli kontrol faktörünün kullanılan güçlendirme malzemesi (GM) olduğu görülmektedir (Çizelge 4.5). Kullanılan GM'ne göre eğilme direnci sonuçları (Çizelge 4.4) incelendiğinde karbon elyaf dokuma kumaş ile güçlendirilen numunelerin (162,94 N/mm²) cam elyaf dokuma kumaş ile güçlendirilen numunelere (155,24 N/mm²) ve güçlendirme yapılmayan kontrol grubu (129,92 N/mm²) örneklerine kıyasla daha iyi eğilme direncine sahip olduğu görülmektedir. ED, kontrol grubu numunelerine göre cam elyaf ile güçlendirilmiş örneklerde %22, karbon elyaf ile güçlendirme işlemi yapılmış örneklerde ise %27 oranında artış gerçekleşmiştir. CE ve KE ile yapılan güçlendirme ile malzemenin kullanım yerlerinde maruz kaldığı yüklere karşı direncini gösteren en önemli mekanik özelliklerden birisi olan ED'nin kayda değer bir şekilde iyileştirilebildiği görülmektedir. Wang vd. (2015) yaptıkları güçlendirilmiş LVL üretimini konu alan çalışmasında Kavak kaplamalar ile cam ve karbon elyaf kullanarak ürettikleri güçlendirilmiş LVL'lerde kontrol grubuna kıyasla sırasıyla %18,2 ve %25,6 oranlarında ED artışı belirlemişlerdir. Çiğdem ve Perçin (2022), cam veya karbon elyaf kullanarak üretmiş oldukları güçlendirilmiş LVL'lerin ED'nde kontrol gruplarına göre CE ile güçlendirilenlerde %12,5 KE ile güçlendirilenlerde %17,12 artış gözlemlendiğini

bildirmişlerdir (Çiğdem ve Perçin, 2022). Yıldırım vd. (2021) yaptıkları çalışmada epoksi ve poliüretan tutkal kullanarak ürettikleri cam elyaf ile güçlendirilmiş LVL'lerin ED'lerini güçlendirilmemiş LVL ile kıyaslamıştır. Her iki tutkal türü için de cam elyaf ile güçlendirilmiş LVL'lerin ED'leri güçlendirilmemişlere kıyasla %52 oranında yüksek olduğu raporlanmıştır. Nadir vd., (2016) cam ve karbon elyaf kullanarak güçlendirilmiş taşıyıcı kirişlerin ED'ni güçlendirme yapılmamış örneklerle kıyasladıkları çalışmada, tek katman karbon elyaf ile güçlendirilmiş kirişlerde ED'nde %46, çift katman olarak güçlendirilenlerde ise %51 arttığı raporlanmıştır. Tek katman cam elyaf ile güçlendirilmiş kirişlerde ise ED'nde %37, çift katman olarak güçlendirilenlerde %40 artış olduğu raporlanmıştır. Çalışmada karbon elyaf ile güçlendirilen numunelerde kırılmanın daha geç olduğunu bildirmişlerdir (Nadir vd., 2016). Diğer yandan cam elyafın bazı direnç özelliklerinin karbon elyafa nazaran daha düşük olduğu bilinmektedir. Örneğin; GTAKP üretiminde kullanılan karbon ve cam elyaf dokuma kumaş tedarikçi bilgilerine göre çekme dirençleri sırasıyla 3950 MPa ve 3445 MPa olarak bildirilmektedir. Bu veriler ışığında karbon elyaf kullanılarak güçlendirilmiş levhanın eğilme direncinin daha yüksek olması beklenen bir sonuçtur. Karbon elyafın cam elyafa göre taşıdığı üstün mekanik özellikler sonucu üretilen GTAKP malzemelerinin mekanik özellikleri üzerinde daha büyük katkı sağladığı söylenebilir. Çalışma sonucunda, GM'nin üretilen GTAKP'nin ED üzerindeki etkilerine yönelik elde edilen bulguların, daha önceden yapılmış benzer çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.7 Ahşap esaslı bazı malzemelerin ED değerleri.

	MALZEME ÇEŞİDİ	ED (x) N/mm ²	
1	Doğu Kayını (masif)	123,7	Kasal vd. 2010
2	Kavak (masif)	61,6	
3	Kayın LVL (Tutkal hattına dik)	97,6	
4	Kavak LVL (Tutkal hattına dik)	72,4	
5	Kayın LVL (kontrol)	103,45	Çiğdem ve Perçin, 2022
6	Kayın LVL (CE-Güçlendirilmiş)	116,41	
7	Kayın LVL (KE-Güçlendirilmiş)	121,16	

Çizelge 4.7. (Devam) Ahşap esaslı bazı malzemelerin ED değerleri.

8	Kavak LVL (kontrol)	90,5	Wang vd. 2015
9	Kavak LVL (KE-Güçlendirilmiş)	113,7	
10	Kavak LVL (CE-Güçlendirilmiş)	106,9	
11	Kavak LVL (KE+CE-Güçlendirilmiş)	129,4	
12	Kayın Kontraplak ÜF	89	Bal ve Bektaş, 2014
13	Kayın Kontraplak MÜF	84,1	
14	Kayın Kontraplak FF	80,2	
15	Kavak Kontraplak ÜF	59	
16	Kavak Kontraplak MÜF	56,3	
17	Kavak Kontraplak FF	56,6	
18	Kavak Kontraplak FF	78,5	Kari vd. 2022
19	Kavak Kontraplak + Kenevir lifi FF	95,3	
20	Kavak Kontraplak FF	82	
21	Kavak Kontraplak + Kenevir lifi FF	66,9	
22	Kavak (masif)	25,8	Liu vd.2019
23	Kavak-Okalıptus LVL	45,8	
24	Kavak-Okalıptus + Karbon fiber LVL	45,9	
25	Kavak-Okalıptus + Karbon fiber 3 katman LVL	84	

Çizelge 4.7’de belirtilen çalışmalarda, farklı ahşap ve ahşap esaslı kompozit malzemelerin ED ‘leri derlenmiştir. Üretilen GTAKP malzeme bu çizelgede belirtilen malzemelere ikame bir üründür. Üretilen GTAKP’nin ED’leri 107,16 - 218,22 N/mm² arasında bulunmuştur. Bu sonuç GTAKP eğilme direncinin Çizelge 4.7 de görülen ikamesi olduğu düşünülen malzemelerden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Varyans analizleri yanı sıra her bir faktörün mekanik özellikler (ED, EEM, VD, DED, YD) üzerindeki katkı düzeyleri regresyon analizi yapılarak belirlenmiştir. Regresyon analizi bir bağımlı değişken ile bir veya daha çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir (Kılıç, 2013). Ayrıca malzeme performans göstergesi olan mekanik özellikler ile bu özellikleri etkileyen kontrol faktörleri arasındaki sebep sonuç ilişkilerini belirlemek üzere regresyon analizleri yapılmıştır. Yapılan regresyon analizleri sonucu performans göstergesi olan mekanik özelliklere yönelik tahminler yapabilmek amacıyla regresyon modelleri (matematiksel model) oluşturulmuştur.

Regresyon modelini oluşturmak için belirtilen koşullar dikkate alındığında ED bağımlı değişken olarak etkilenen değişken olup, bağımsız değişkenler ise; AT, TT, TM, PS, PSC ve GM etkileyen değişkenlerdir. Yapılan çalışmada tutkal hattına dik eğilme direnci için ilgili faktörler arasındaki etkileşimden faydalananarak, regresyon analizi ile elde edilen matematiksel model (4.1) aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
 ED = & 149,03 - 13,61 ATK1 + 13,61 ATK2 + 6,47 TTE - 6,47 TTP \\
 & - 5,79 TM1 + 1,45 TM2 + 4,34 TM3 + 1,18 PS1 + 0,17 PS2 - 1,34 PS3 \\
 & - 0,67 PSC1 - 3,53 PSC2 + 4,20 PSC3 + 6,20 GMC + 13,91 GMK \\
 & - 20,11 GMKO
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

*ATK1 Ağaç türü Kavak, ATK2 Ağaç türü Kayın, TTE Tutkal Türü Epoksi, TTP tutkal Türü Poliüretan, TM1 Tutkal Miktarı 100g/m², TM2 Tutkal Miktarı 150g/m², TM3 Tutkal Miktarı 200g/m², PS1 Pres süresi 15 dk., PS2 Pres süresi 20 dk., PS3 Pres süresi 25 dk., PSC1 Pres sıcaklığı 100 °C, PSC2 Pres sıcaklığı 120 °C, PSC3 Pres sıcaklığı 140 °C, GMC Güçlendirme malzemesi cam elyaf, GMK Güçlendirme malzemesi karbon elyaf, GMKO Kontrol grubu

$$R^2 = \%79,58$$

Eşitlik 4.1 incelendiğinde değişkenler arasında kuvvetli sayılabilecek ($R^2 = \%79,58$) seviyede bir ilişki olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel çalışmada bağımlı değişken olan eğilme direncinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünüldükçe göz önünde bulundurulmuş bağımsız değişkenlerin (AT, TT, TM, PS, PSC, GM) doğru tahmin edildiği ve eğilme direncindeki değişimi yaklaşık %80 oranında açıkladığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, regresyon modeli ile yapılan çalışmada iyi bir öngöründe bulunulduğu ve çalışmanın realiteler ile paralel olduğu sonucuna varılmaktadır.

Belirlenen optimum üretim parametrelerinin kullanılan deney tasarımında var olup olmadığı kontrol edilerek doğrulama deneyi yapıp yapılmayacağına karar verilmektedir. Elde edilen optimum üretim parametre kombinasyonu değerlendirilirken aynı S/G yanıt oranına sahip parametrelere göre alternatifli olarak bu karşılaştırmanın yapılması ve doğrulama deneyine karar verilmesi uygun olacaktır.

Doğrulama deneyleri Taguchi yönteminde uygulanan son işlem basamağıdır. Taguchi optimizasyonu sonucu elde edilen optimum faktör parametreleri ile elde edilen deneysel sonucun %95 güven aralığında test edilmesi amacıyla doğrulama deneyleri yapılmaktadır. Eğilme direnci üzerinde en büyük etkiye sahip faktörlerin sırasıyla ağaç türü, güçlendirme malzemesi ve tutkal türü olduğu belirlenmiştir. Tutkal miktarı, pres süresi ve pres sıcaklığı faktörlerinin ise bu özellikler üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığı görülmektedir. Bu bilgiler, GTAKP üretiminde eğilme direncini

iyileştirmek için ağaç türü, tutkal türü ve güçlendirme malzemesinin doğru seçiminin önemli olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.8’de optimum ED – S/G oranının oluşturan faktör ve faktör seviyeleri verilmiştir. Bu parametreler kullanılarak doğrulama deneyi yapılmıştır.

Çizelge 4.8. Optimum ED S/G oranını oluşturan faktör kombinasyonu.

AT	TT	TM g/m ²	PS Dk.	PSC °C	GM	DD - ED (N/mm ²) $\bar{X}$
Kayın	Epoksi	200	25	140	Karbon Elyaf	226,82

Doğrulama deneyi için Çizelge 4.8’de belirtilen faktör ve seviyelerinde üretilmiş ve numunelere ED testi uygulanmıştır. Bu değerler dikkate alındığında optimum seviyeler için ortalama doğrulama deneyi sonucu $ED_t = 93,35 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin doğruluğu için güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı maksimum ve minimum bir değerdir. Eşitlik 3.6 ve 3.7 ye göre yapılan hesaplamalar sonucu $CI = 10,19$ olarak hesaplanmıştır. ED için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu %95 güven aralığı dikkate alınarak $(226,82 \text{ (N/mm}^2) \pm 10,19)$ ya da $(216,618 - 237,009 \text{ (N/mm}^2))$ arası beklenmektedir. Optimum faktör seviyeleri dikkate alınarak yürütülen doğrulama deneyi ED değerleri sırasıyla 199,860; 205,650; 225,100; 210,203; 226,820; 227,100; 228,010; 235,500; 238,760; 254,520 (N/mm²) olarak elde edilmiş ve bunların ortalaması $226,82 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Doğrulama deneyleri ortalaması belirlenen güven $(216,618 < 226,82 < 237,00 \text{ (N/mm}^2))$ düzeyinde gerçekleşmiştir. Doğrulama deney sonucunda elde edilen verilerin aritmetik ortalaması en yüksek eğilme direnci olan faktör kombinasyonundan (SN24- 218,22 N/mm²) %3,9 daha yüksek bir değer elde edilmiştir.

4.2.2. Eğilmede Elastikiyet Modülü ve Parametre Optimizasyonu

Elastikiyet, katı bir maddeye düşük gerilmelerde uygulanan yükten ötürü meydana gelen deformasyonların uygulanan yükün kaldırılması sonucu ortadan kalkmasını tanımlanmaktadır (Göker ve As, 1990).

Çizelge 4.9’da çalışmaya esas L₃₆ ortogonal dizini kullanılarak üretilen malzemelerden hazırlanmış deney numunelerinden elde edilen ortalama EEM, bu değerler kullanılarak hesaplanan S/G oranları ve standart sapmaları verilmiştir.

Çizelge 4.9. EEM aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.

SN	AT	TT	TM g/m ²	PS dk	PSC °C	GM	EEM $\bar{X}$ (N/mm ²)	EEM S/G Oranı (dB)	SS
1	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	21472,00	86,82	876,02
2	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	26523,60	88,17	1770,49
3	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	21208,90	86,48	894,30
4	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	27030,90	86,82	876,02
5	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	24790,70	88,17	1770,49
6	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	20985,50	86,48	894,30
7	Kavak	Epoksi	100	15	120	Kontrol	20844,80	86,38	866,03
8	Kavak	Epoksi	150	20	140	Cam	25556,80	88,15	1255,50
9	Kavak	Epoksi	200	25	100	Karbon	30497,50	89,69	1358,21
10	Kavak	Poliüretan	100	15	140	Karbon	28794,00	89,19	2785,10
11	Kavak	Poliüretan	150	20	100	Kontrol	24025,00	87,61	896,72
12	Kavak	Poliüretan	200	25	120	Cam	23446,30	87,40	1496,36
13	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Cam	23863,40	87,55	2857,75
14	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Karbon	26254,40	88,38	853,27
15	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Kontrol	23944,30	87,58	1174,95
16	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Karbon	25371,20	88,09	2017,44
17	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Kontrol	21774,00	86,76	893,61
18	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Cam	23437,50	87,40	1856,41
19	Kayın	Epoksi	100	20	100	Kontrol	22794,20	87,16	4464,44
20	Kayın	Epoksi	150	25	120	Cam	25201,90	88,03	1210,43
21	Kayın	Epoksi	200	15	140	Karbon	27954,10	88,93	394,01
22	Kayın	Epoksi	100	20	120	Kontrol	22402,80	87,01	494,23
23	Kayın	Epoksi	150	25	140	Cam	25679,80	88,19	1293,63
24	Kayın	Epoksi	200	15	100	Karbon	32146,00	90,14	915,12
25	Kayın	Epoksi	100	25	120	Cam	24340,60	87,73	640,80
26	Kayın	Epoksi	150	15	140	Karbon	28176,20	89,00	1814,72
27	Kayın	Epoksi	200	20	100	Kontrol	25177,20	88,02	1128,94
28	Kayın	Poliüretan	100	25	120	Karbon	27148,00	88,67	2425,00
29	Kayın	Poliüretan	150	15	140	Kontrol	23658,00	87,48	4292,56
30	Kayın	Poliüretan	200	20	100	Cam	26489,60	88,46	902,95
31	Kayın	Poliüretan	100	25	140	Kontrol	24470,70	87,77	663,21
32	Kayın	Poliüretan	150	15	100	Cam	26320,10	88,41	1658,30
33	Kayın	Poliüretan	200	20	120	Karbon	31630,60	90,00	1850,68
34	Kayın	Poliüretan	100	25	100	Karbon	29035,80	89,26	2499,44
35	Kayın	Poliüretan	150	15	120	Kontrol	24338,00	87,73	1035,50
36	Kayın	Poliüretan	200	20	140	Cam	27052,22	88,64	973,94

*SN Sıra Numarası, *AT Ağaç Türü, *TT Tutkal Türü, *TM Tutkal Miktarı, *PS Pres Süresi, *PSC Pres Sıcaklığı,

*GM Güçlendirme Malzemesi, * $\bar{X}$ Aritmetik ortalama, S/G Sinyal Gürültü oranı, SS Standart Sapma

Çizelge 4.9'dan görüldüğü üzere en yüksek EEM değeri (32146 N/mm^2), 200 gr/m^2 epoksi tutkalı, 100°C pres sıcaklığı, 15 dk. pres süresi, karbon elyaf güçlendirme malzemesi ve Kayın kaplamalar kullanılarak üretilen örneklerden elde edilmiştir. En düşük eğilmede elastikiyet modülü değeri ise ($20844,8 \text{ N/mm}^2$), 100 gr/m^2 epoksi tutkalı, 120°C pres sıcaklığı, 15 dk. pres süresi ile güçlendirme malzemesi kullanılmamış (kontrol) Kavak örneklerden üretilmiş deney numunelerinden elde edilmiştir.

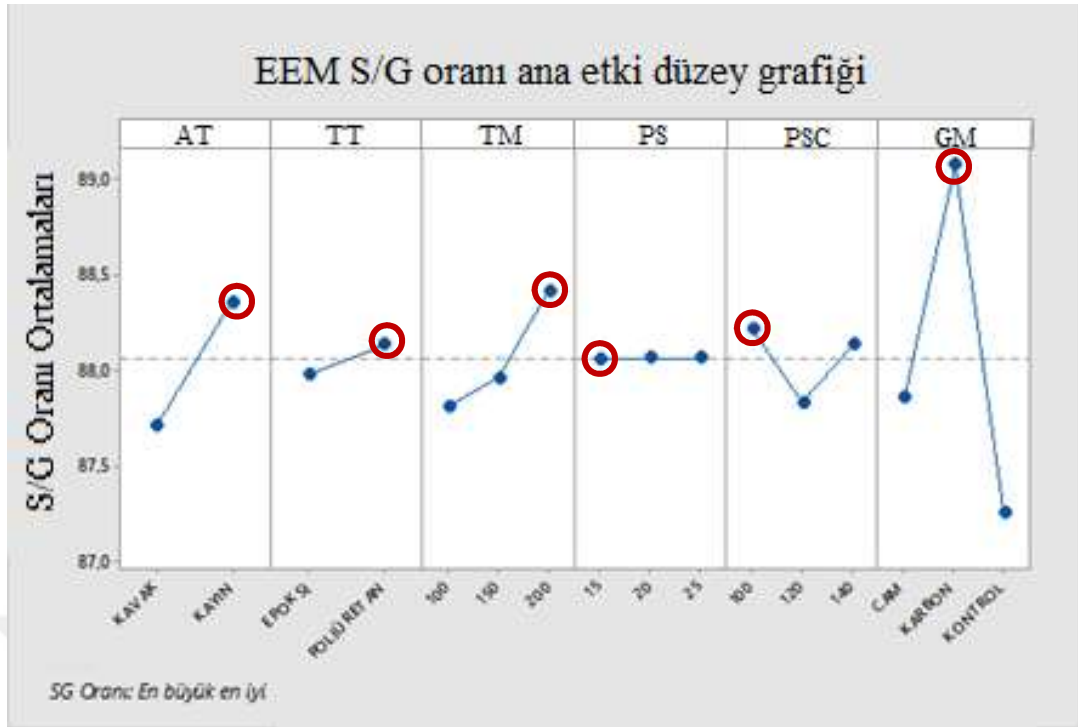
EEM üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini gösteren S/G oranları yanıt tablosu Çizelge 4.10'de görülmektedir.

Çizelge 4.10. EEM için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.

Seviye	AT	TT	TM	PS	PSC	GM
1	87,71	87,99	87,78	88,1	88,25	87,89
2	88,37	88,13	87,99	88,08	87,83	89,05
3			88,43	88,03	88,13	87,27
Delta	0,66	0,14	0,65	0,06	0,42	1,78
Önem sırası	2	5	3	6	4	1

Çizelge 4.10 incelendiğinde incelendiğinde üretilen GTAKP malzemenin ED üzerinde en fazla etkiye sahip olan faktörün kullanılan güçlendirme malzemesi (GM) olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla ağaç türü (AT), tutkal miktarı (TM), pres sıcaklığı (PSC), tutkal türü (TT) ve pres süresi (PS) izlemektedir.

Kontrol faktörlerinin EEM'ne göre optimum değerlerini gösteren S/G oranı için ana etki düzey grafiği Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. EEM için S/G oranları ana etki düzey grafiği.

Şekil 4.4 incelendiğinde AT faktörü ikinci seviyesi (Kayın), TT ikinci seviyesi (Poliüretan), TM üçüncü seviyesi 200 g/m², PS birinci seviyesi 15 dk., PSC birinci seviyesi 100 °C ve GM için ikinci seviye olan karbon elyaf dokuma kumaş kullanımı faktör seviyeleri optimum üretim parametre kombinasyonunu oluşturduğu görülmektedir.

EEM için elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, EEM ve ED açısından faktörlerin önem sıralamasında bazı değişiklikler oluşmasına rağmen en önemli ilk iki faktör (güçlendirme malzemesi ve ağaç türü) sıralaması değişmemiştir.

EEM için yapılan ANOVA sonuçları %95 güven düzeyinde ($p \leq 0,05$) değerlendirilmiştir (Çizelge 4.11).

Çizelge 4.11. EEM için ANOVA sonuçları.

Kontrol Faktörü	Serbestlik Derecesi (df)	Katkı Düzeyi (%)	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F-Değeri	P-Değeri (p≤0,05)
AT	1	12,06	37511583	37511583	12,06	0,002
TT	1	1,05	3253586	3253586	1,05	0,316
TM	2	4,90	15236866	7618433	2,45	0,107
PS	2	0,56	1728306	864153	0,28	0,760
PSC	2	2,10	6544370	3272185	1,05	0,364
GM	2	54,33	168953963	84476981	27,17	0,000
Hata	25	25,00	77734361	3109374		
Toplam	35	100,00				

* $p \leq 0,05$: anlamlı, $p > 0,05$: anlamsız

Çizelge 4.11 incelendiğinde en fazla etkiye sahip olan kontrol faktörünün %54,33 oranıyla GM olduğu bunu %12,06 ile AT faktörünün takip ettiği görülmektedir. Diğer kontrol faktörleri olan TT, TM, PS ve PSC faktörlerinin ise EEM üzerinde İstatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadıkları belirlenmiştir. Tüm kontrol faktörleri dikkate alındığında ise EEM üzerindeki toplam etki düzeylerinin yaklaşık %75 oranında olduğunu ve çalışmada kullanılan kontrol faktörlerinin yaklaşık %25 oranında EEM üzerindeki etkileri açıklamadığını ya da kontrol edilemeyen çevresel faktörler tarafından etkilendiği söylenebilir. Bu sonuç, Taguchi yöntemi ile elde edilen S/G yanıt tablosu (Çizelge 4.5) ve S/G oranı için ana etki düzey grafiği (Çizelge 4.4) ile elde edilen parametre optimizasyonunu desteklemektedir.

AT'nin EEM üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, Kayın ile üretilmiş numunelerin EEM, Kavak ile üretilen numunelere göre yaklaşık %8 daha yüksek olduğu görülmektedir. Ağaç malzemenin yoğunluğu ile eğilme direnci ve elastikiyet modülü arasında bir ilişki olduğu bilinmektedir (Bodig ve Jayne, 1993; Perçin vd. 2009; Missanjo ve Matsumura, 2016; Bal ve Bektaş, 2018). Bu bağlamda ağaç türüne bağlı olarak ortaya çıkan farkın literatür ile uyumlu olduğu ve yoğunluğu daha fazla olan ağacın ED ve EEM'nin daha yüksek olduğu söylenebilmektedir.

Kontrol faktörlerinin EEM üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, en önemli kontrol faktörünün kullanılan güçlendirme malzemesi (GM) olduğu (Çizelge 4.10)

görülmektedir. GM'nin EEM sonuçları incelendiğinde karbon elyaf dokuma kumaş ile güçlendirilen numunelerin (24778 N/mm²) cam elyaf dokuma kumaş ile güçlendirilen numunelere (28193 N/mm²) ve güçlendirme yapılmayan kontrol grubu (22968 N/mm²) örneklerine kıyasla daha iyi EEM'ne sahip olduğu görülmüştür. Kontrol grubu numunelere göre kıyaslandığında, cam elyaf ile güçlendirilmiş örneklerin EEM %7,8, karbon elyaf ile güçlendirme işlemi yapılmış örneklerinki ise %23 oranında yüksek bulunmuştur. Karbon elyafın cam elyafa göre taşıdığı üstün mekanik özellikler sonucu üretilen GTAKP malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde daha büyük katkı sağladığı söylenebilir. Ahşap esaslı kompozit panellerin güçlendirilmesinin ele alındığı çalışmalarda güçlendirme malzemesi kullanılarak mekanik özelliklerinde önemli oranlarda artış olduğu bildirilmiştir (Wei vd. 2013; Bal, 2014; Bal ve Özyurt 2015; Guo vd. 2017, Moradpour vd. 2018; Nadir vd. 2016; Karaman ve Yıldırım 2018; Zhang vd. 2020; Çiğdem ve Perçin, 2022). Yıldırım vd. (2021) yaptıkları çalışmada epoksi ve poliüretan tutkal kullanarak ürettikleri cam elyaf ile güçlendirilmiş LVL'lerin EEM'lerini güçlendirilmemiş LVL ile kıyaslamıştır. Sonuç olarak her iki tutkal türü için de cam elyaf ile güçlendirilmiş LVL'lerin EEM'leri güçlendirilmemişlere kıyasla %33 oranında yüksek olduğu raporlanmıştır.

Çalışmada sonucunda, GM'nin üretilen GTAKP'nin EEM üzerindeki etkilerine yönelik elde edilen bulguların, daha önceden yapılmış benzer çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.12. Ahşap esaslı bazı malzemelerin EEM değerleri.

	MALZEME ÇEŞİDİ	EEM(X) N/mm ²	KAYNAK
1	Doğu Kayını (masif)	11430	Kasal vd. 2010
2	Kavak (masif)	7772	
3	Kayın LVL (Tutkal hattına dik)	10046,9	
4	Kavak LVL (Tutkal hattına dik)	7820,4	
5	Kayın LVL (kontrol)	11665	Çiğdem ve Perçin, 2022
6	Kayın LVL (CE-Güçlendirilmiş)	12314	
7	Kayın LVL (KE-Güçlendirilmiş)	13299	
8	Kavak LVL (kontrol)	8142,5	Wei vd. 2013
9	Kavak LVL (KE- Tek katman Güçlendirilmiş)	11384,6	
10	Kavak LVL (KE- Çift katman Güçlendirilmiş)	13629,6	

Çizelge 4.12. (Devam) Ahşap esaslı bazı malzemelerin EEM değerleri.

11	Kavak LVL (kontrol)	9185,8	Wang vd. 2015
12	Kavak LVL (KE-Güçlendirilmiş)	11016,5	
13	Kavak LVL (CE-Güçlendirilmiş)	10365	
14	Kavak LVL (KE+CE-Güçlendirilmiş)	12544	
15	Kayın Kontraplak (5x3mm=15mm) ÜF	8636	Bal ve Bektaş, 2014
16	Kayın Kontraplak (5x3mm=15mm) MÜF	8231	
17	Kayın Kontraplak (5x3mm=15mm) FF	8258	
18	Kavak Kontraplak (5x3mm=15mm) ÜF	6875	
19	Kavak Kontraplak (5x3mm=15mm) MÜF	6634	
20	Kavak Kontraplak (5x3mm=15mm) FF	6774	
21	Kavak Kontraplak (5x2mm=15mm) FF	5280	Kari vd. 2022
22	Kavak Kontraplak + Kenevir lifi (5x2mm=15mm) FF	5710	
23	Kavak Kontraplak (5x2mm=15mm) FF	7650	
24	Kavak Kontraplak + Kenevir lifi (5x2mm=15mm) FF	5560	
25	Kavak	3440	Liu vd.2019
26	Kavak-Okaliptus LVL	5630	
27	Kavak-Okaliptus + Karbon fiber LVL	5800	
28	Kavak-Okaliptus + Karbon fiberx3katman LVL	6110	

Çizelge 4.12’de, farklı ahşap ve ahşap esaslı kompozit malzemelerin EEM değerleri derlenmiştir. Üretilen GTAKP’nin EEM’leri 20844 – 32146 N/mm² arasında bulunmuştur. Bu sonuç üretilen GTAKP’lerin Çizelge 4.12 de görülen malzemelerin ikamesi olduğu düşünülen malzemelerden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlara ek olarak malzeme performans göstergesi olan mekanik özellikler ile bu özellikleri etkileyen kontrol faktörleri arasındaki sebep sonuç ilişkilerini belirlemek üzere regresyon analizleri yapılmıştır.

Regresyon modelini oluşturmak için belirtilen koşullar dikkate alındığında EEM bağımlı değişken olarak etkilenen değişken olup, bağımsız değişkenler ise; AT, TT, TM, PS, PSC ve GM etkileyen değişkenlerdir. Yapılan çalışmada eğilmede elastikiyet modülü için ilgili faktörler arasındaki etkileşimden faydalanarak, regresyon analizi ile elde edilen matematiksel model (4.2) sunulmuştur.

$$EEM = 25313 - 1021 ATK1 + 1021 ATK2 - 301 TTE + 301 TTP - 729 TM1 - 122 TM2 + 851 TM3 + 150 PS1 + 160 PS2 - 310 PS3 + 559 PSC1 - 476 PS C2 - 83 PSC3 - 535 GMC + 2880 GMK - 2345 GMKO \quad (4.2)$$

*ATK1 Ağaç türü Kavak, ATK2 Ağaç türü Kayın, TTE Tutkal Türü Epoksi, TTP tutkal Türü Poliüretan, TM1 Tutkal Miktarı 100g/m², TM2 Tutkal Miktarı 150g/m², TM3 Tutkal Miktarı 200g/m², PS1 Pres süresi 15 dk., PS2 Pres süresi 20 dk., PS3 Pres süresi 25 dk., PSC1 Pres sıcaklığı 100 °C, PSC2 Pres sıcaklığı 120 °C, PSC3 Pres sıcaklığı 140 °C, GMC Güçlendirme malzemesi cam elyaf, GMK Güçlendirme malzemesi karbon elyaf, GMK Kontrol grubu

$$R^2 = \%83,70$$

Eşitlik 4.2 incelendiğinde değişkenler arasında kuvvetli ($R^2 = \%83,80$) seviyede bir ilişki olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel çalışmada bağımlı değişken olan elastikiyet modülünün belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülerek göz önünde bulundurulmuş bağımsız değişkenlerin (AT, TT, TM, PS, PSC, GM) doğru tahmin edildiği ve elastikiyet modülündeki değişimi yaklaşık %84 oranında açıkladığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, regresyon modeli ile yapılan çalışmada iyi bir öngöründe bulunulduğu ve çalışmanın realiteler ile paralel olduğu sonucuna varılmaktadır.

Doğrulama deneyleri Taguchi yönteminde uygulanan son işlem basamağıdır. Çizelge 4.13’de optimum EEM – S/G oranının oluşturan faktör ve faktör seviyeleri verilmiştir. Bu parametreler kullanılarak doğrulama deneyi yapılmıştır.

Çizelge 4.13. Optimum EEM - S/G oranını oluşturan faktör kombinasyonu.

AT	TT	TM g/m ²	PS Dk.	PSC °C	GM	DD - EEM (N/mm ²) $\bar{X}$
Kayın	Poliüretan	200	15	100	Karbon Elyaf	34356,20

Çizelge 4.13 İncelendiğinde S/G oranları optimum faktör kombinasyonunu, Kayın ağaç türünde, 100g/m² poliüretan tutkal kullanılarak 100 °C sıcaklıkta 15 dk. preslenmiş ve cam elyaf ile güçlendirilmiş deney örneklerinde olduğu görülmektedir. Doğrulama deneyi yapılması amacıyla Çizelge 4.13’de belirtilen faktör kombinasyonunda üretilmiş DD numunelerine EEM testi uygulanmıştır. Bu değerler dikkate alındığında optimum seviyeler için ortalama doğrulama deneyi sonucu $EEM_t = 34356,20 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin doğruluğu için güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı maksimum ve minimum bir değerdir. Eşitlik 3.6 ve 3.7 ye göre yapılan

hesaplamalar sonucu $CI = 324,37$ olarak hesaplanmıştır. EEM için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu %95 güven aralığı dikkate alınarak $(34356,20 \text{ (N/mm}^2) \pm 324,37)$ ya da $(34031,83 - 34680,56 \text{ (N/mm}^2))$ arası beklenmektedir. Optimum faktör seviyeleri dikkate alınarak yürütülen doğrulama deneyi EEM değerleri sırasıyla 33581,20; 33736,20; 34081,20; 34150,00; 34356,20; 34356,20; 34455,00; 34820,00; 35001,00; 35025,00 (N/mm^2) olarak elde edilmiş ve bunların ortalaması $34356,20 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Doğrulama deneyleri ortalaması belirlenen güven $(34031,83 < 34356,20 < 34680,57 \text{ (N/mm}^2))$ düzeyinde gerçekleşmiştir. Doğrulama deney sonucunda elde edilen verilerin aritmetik ortalaması en yüksek EEM olan faktör kombinasyonundan (SN34) %4,4 daha yüksek bir değer elde edilmiştir.

4.2.3. Vida Çekme Direnci ve Parametre Optimizasyonu

Vida çekme direncinin tespiti, GTAKP malzemelerin kullanım alanlarındaki servis verilebilirlik performansı açısından belirlenmesi gereken önemli dayanım karakteristiklerinden birisidir. Ortaya çıkan ürünün vida ile birleştirilebilmesi kullanılabilirlik açısından tercih edilebilirliğini artıcağı düşünülmektedir.

Çizelge 4.14’da çalışmaya esas L_{36} ortogonal dizini kullanılarak üretilen malzemelerden hazırlanmış deney numunelerinden elde edilen ortalama VD, bu değerler kullanılarak hesaplanan S/G oranları ve standart sapmaları verilmiştir.

Çizelge 4.14. VD aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.

SN	AT	TT	TM g/m ²	PS Dk.	PSC °C	GM	VD $\bar{X}$ (N/mm ²)	VD S/G Oranı (dB)	SS
1	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	52.98	34.18	4.81
2	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	39.84	32.91	4.88
3	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	49.10	33.43	3.33
4	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	49.58	34.18	4.81
5	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	50.44	32.91	4.88
6	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	44.99	33.43	3.33
7	Kavak	Epoksi	100	15	120	Kontrol	44.68	33.00	3.80
8	Kavak	Epoksi	150	20	140	Cam	41.09	32.28	3.84
9	Kavak	Epoksi	200	25	100	Karbon	58.19	35.30	4.59
10	Kavak	Poliüretan	100	15	140	Karbon	47.30	33.50	4.14

Çizelge 4.14. (Devam) VD aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.

11	Kavak	Poliüretan	150	20	100	Kontrol	43.96	32.86	3.09
12	Kavak	Poliüretan	200	25	120	Cam	42.05	32.47	4.41
13	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Cam	46.88	33.42	5.17
14	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Karbon	47.20	33.48	4.88
15	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Kontrol	36.84	31.33	2.34
16	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Karbon	50.60	34.08	5.67
17	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Kontrol	32.21	30.16	1.47
18	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Cam	48.89	33.78	6.39
19	Kayın	Epoksi	100	20	100	Kontrol	41.40	32.34	4.10
20	Kayın	Epoksi	150	25	120	Cam	59.60	35.51	4.36
21	Kayın	Epoksi	200	15	140	Karbon	70.71	36.99	5.20
22	Kayın	Epoksi	100	20	120	Kontrol	47.54	33.54	3.88
23	Kayın	Epoksi	150	25	140	Cam	60.44	35.63	4.47
24	Kayın	Epoksi	200	15	100	Karbon	71.50	37.09	6.02
25	Kayın	Epoksi	100	25	120	Cam	55.14	34.83	4.47
26	Kayın	Epoksi	150	15	140	Karbon	66.08	36.40	6.37
27	Kayın	Epoksi	200	20	100	Kontrol	56.34	35.02	5.99
28	Kayın	Poliüretan	100	25	120	Karbon	54.94	34.80	2.85
29	Kayın	Poliüretan	150	15	140	Kontrol	45.45	33.15	2.59
30	Kayın	Poliüretan	200	20	100	Cam	56.46	35.03	2.53
31	Kayın	Poliüretan	100	25	140	Kontrol	42.48	32.56	3.08
32	Kayın	Poliüretan	150	15	100	Cam	59.05	35.43	3.90
33	Kayın	Poliüretan	200	20	120	Karbon	58.17	35.29	3.73
34	Kayın	Poliüretan	100	25	100	Karbon	50.49	34.06	3.66
35	Kayın	Poliüretan	150	15	120	Kontrol	48.39	33.69	4.09
36	Kayın	Poliüretan	200	20	140	Cam	63.16	36.01	2.37

*SN Sıra Numarası, *AT Ağaç Türü, *TT Tutkal Türü, *TM Tutkal Miktarı, *PS Pres Süresi, *PSC Pres Sıcaklığı, *GM Güçlendirme Malzemesi, * $\bar{X}$ Aritmetik ortalama, S/G Sinyal Gürültü oranı, SS Standart Sapma

Çizelge 4.14'dan görüldüğü üzere en yüksek VD (71,50 N/mm²), 200 gr/m² epoksi tutkalı, 100 °C pres sıcaklığı, 15 dk. pres süresi, karbon elyaf güçlendirme malzemesi ve Kayın kaplamalar kullanılarak üretilen örneklerden elde edilmiştir. En düşük VD değeri ise (32,21 N/mm²), 150 gr/m² poliüretan tutkalı, 100 °C pres sıcaklığı, 25 dk pres süresi ile güçlendirme malzemesi kullanılmamış Kavak örneklerden üretilmiş deney numunelerinden elde edilmiştir.

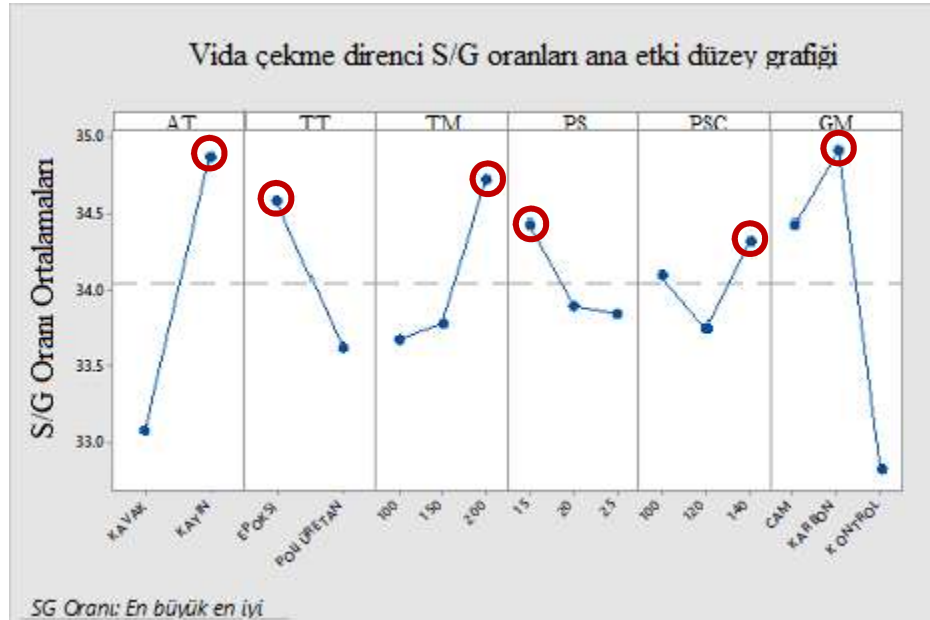
VD üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini gösteren S/G oranları yanıt tablosu Çizelge 4.15’de görülmektedir.

Çizelge 4.15. VD için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.

Seviye	AT	TT	TM	PS	PSC	GM
1	33.08	34.56	33.67	34.41	34.09	34.42
2	34.85	33.62	33.77	33.89	33.74	34.90
3			34.70	33.84	34.31	32.83
Delta	1.78	0.94	1.04	0.57	0.57	2.07
Önem sırası	2	4	3	5	6	1

Çizelge 4.15 incelendiğinde üretilen GTAKP malzemenin VD üzerinde, kullanılan güçlendirme malzemesinin (GM) en fazla etkiye sahip olan kontrol faktörü olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla ağaç türü (AT), tutkal miktarı (TM), tutkal türü (TT), pres süresi (PS) ve pres sıcaklığı (PSC) kontrol faktörleri izlemektedir.

Kontrol faktörlerinin VD’ne göre optimum değerlerini gösteren S/G oranı için ana etki düzey grafiği Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. VD için S/G oranları ana etki düzey grafiği.

Şekil 4.5 incelendiğinde AT faktörü ikinci seviyesi (Kayın), TT birinci seviyesi (epoksi), TM üçüncü seviyesi (200 g/m²), PS birinci seviyesi olan 15 dk., PSC üçüncü seviyesi 140 °C ve GM için ikinci seviye olan karbon elyaf dokuma kumaş kullanımı faktör seviyeleri optimum üretim parametre kombinasyonunu oluşturduğu görülmektedir.

VD için yapılan ANOVA sonuçları %95 güven düzeyinde ($p \leq 0,05$) değerlendirilmiştir. VD için elde edilen ANOVA sonuçları Çizelge 4.16’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. VD için ANOVA sonuçları.

Kontrol Faktörü	Serbestlik Derecesi (df)	Katkı Düzeyi (%)	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F-Değeri	P-Değeri ($p \leq 0,05$)
AT	1	31,63	905,21	905,41	44,7	0,000
TT	1	7,03	201,26	201,35	9,94	0,004
TM	2	8,98	128,61	128,56	6,35	0,006
PS	2	3,95	56,51	56,50	2,79	0,081
PSC	2	2,82	40,3	40,35	1,99	0,158
GM	2	27,90	399,24	399,32	19,71	0,000
Hata	25	17,69	20,25	20,26		
Toplam	35	100,00		0,07384		

* $p \leq 0,05$: anlamlı, $p > 0,05$: anlamsız

Çizelge 4.16 incelendiğinde, AT, TT, TM ve GM’nin VD üzerinde istatistiksel olarak anlamlı fark oluşturduğu ($p \leq 0,05$) ve etki düzeylerinin sırasıyla %31,63; %7,03; %8,98 ve %27,90 olduğu görülmektedir. Diğer kontrol faktörleri olan PS ve PSC faktörlerinin ise VD üzerinde İstatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadıkları belirlenmiştir.

Tüm kontrol faktörleri dikkate alındığında ise VD üzerindeki toplam etki düzeylerinin yaklaşık %83 oranında olduğunu ve çalışmada kullanılan kontrol faktörlerinin yaklaşık %18 oranında VD üzerindeki etkileri açıklanamadığını ya da kontrol edilemeyen çevresel faktörler tarafından etkilendiği söylenebilir.

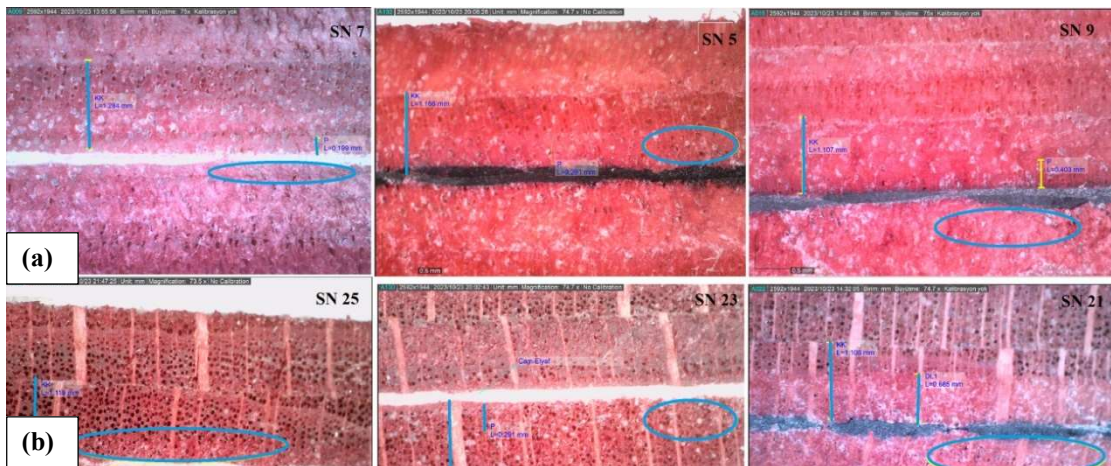
VD için elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, Kayın ile üretilmiş numunelerin vida çekme direnci Kavak ile üretilen numunelere göre daha iyi olduğu görülmektedir. Bal vd. (2013) farklı ağaç kaplamalardan ürettikleri LVL (TKK) örneklerine uygulanan vida çekme direnci testinde; Kayın ile üretilmiş LVL’nin Kavak ile üretilmişlere göre %89

daha yüksek vida çekme direncine sahip olduğu bildirmişlerdir. Bu durumun sebebini yoğunluk farkı ve odun lif yapısı farklılıkları ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir (Bal vd. 2013). Ayrıca Bal (2016a) farklı ağaç türleri (okaliptüs ve kavak) ile kombinasyon oluşturarak ürettiği LVL plakaların vida tutma performansını incelediği çalışmada ise kullandığı ağaç türüne bağlı olarak %66,6 oranında iyileşme sağlanabildiğini ve bu farkın kullanılan odun hammaddesindeki yoğunluk ile ilişkili olduğunu bildirmiştir (Bal, 2016a).

TT'nin VD üzerine etkileri irdelendiğinde, EPX ile üretilmiş örneklerin PU ile üretilmiş örneklerle göre %9,7 daha iyi VD oluşturduğu görülmüştür. Yapılan ED testinde de görüleceği üzere EPX ile üretilen örneklerin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sonuç EPX tutkalın PU'a göre kaplamalara daha iyi nüfuz etmesi (Şekil 5.3.), boşuk ve çatlak doldurma kabiliyetinin yüksek olması, dolayısıyla da üretilen GTAKP'lerin direnç özelliklerini arttırmanından kaynaklanmış olabilir.

TM parametresinde 200 g/m² tutkal uygulaması yapılan numunelerde en iyi vida tutunma değeri elde edilmiş olup bu değeri sırasıyla 150g/m² ve 100g/m² değerleri takip etmiştir (Şekil 4.6). Yapılmış çalışmalarda (Fang vd. 2013, Chang vd. 2016, Song vd. 2018) tutkal miktarının artmasına bağlı olarak penetrasyonun artması ve üretilen malzemelerin mekanik özelliklerinde (ED, EEM, YD) iyileşme sağlandığı bildirilmiştir.

Her iki tutkal içinde tutkal miktarı arttıkça VD değerinde de artış meydana gelmiştir. Tutkal miktarının artması ahşap içerisine nüfuz eden tutkalın artmasını sağlamakla birlikte (Şekil 4.6) vida dişinin tutunmasını arttırdığı ve bu sayede VD'nde artışa neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.6. Farklı gramajlarda tutkal penetrasyon oranları (sırasıyla 100-150-200 g/m²)
a)EPX b) PU.

GM'nin VD üzerinde olan etkileri incelendiğinde ise Cam / karbon elyaf / elyafsız olarak üretilmiş grubun vida çekme performansları en yüksek değerden başlayarak ortalama vida dirençleri karbon elyaf (55,45 N/mm²), cam elyaf (52,97 N/mm²) ve kontrol grubu (güçlendirme malzemesi kullanılmamış) (44,45 N/mm²) numunelerinden oluştuğu görülmektedir. GM kullanılarak üretilen örneklerin VD'leri KE kullanılanlarda %25, CE kullanılanlarda ise %19,16 yüksek bulunmuştur.

Auriga vd. (2020) karbon elyaf ile güçlendirme işlemi yapılmış LVL panellerde elyafın vida çekme direnci üzerinde kısmi etkisinin olduğunu bildirmişlerdir (Auriga vd., 2020). Bal ve Efe (2015) cam elyaf kullanarak güçlendirdikleri LVL vida çekme direnci değerini ölçtükleri çalışmada, güçlendirilmiş LVL'lerin güçlendirilmemişlere göre %7,5 daha yüksek direnç gösterdiğini bildirmişlerdir. Çizelge 4.17'de bazı tabakalı ahşap kompozit panellerin vida çekme dayanımı ortalamaları verilmiştir.

Çizelge 4.17. Bazı tabakalı ahşap kompozit panel ortalama VD değerleri.

MALZEME ÇEŞİDİ	VD (x) N/mm ²	Kaynak
Sarıçam Masif	25,97	Perçin ve Uzun (2022)
Sarıçam LVL	26,19	
Sarıçam LVL KE ile güçlendirilmiş	29,81	
Sarıçam LVL CE ile güçlendirilmiş	28,47	
Sapsız Meşe LVL	23,14	Perçin (2016)
Sapsız Meşe KE ile güçlendirilmiş LVL	25,59	
Tik masif	12,90	Meekum ve Mingmongkol (2011)
Kauçuk Masif	12,90	
Okaliptus masif	15,10	
Kauçuk LVL CE Güçlendirilmiş	16,50	
Kavak LVL	21,30	Bal, (2016a)
Alt Üst 1 katman Okaliptus + Kavak LVL	26,20	
Alt Üst 2 katman Okaliptus + Kavak LVL	28,90	
Okaliptus LVL	35,50	
Kavak LVL	26,90	Bal, (2021a)
Kavak LVL + 1+1 katman CE	28,10	
Kavak LVL + 1+1+1+1 katman CE	28,20	
Kavak LVL + her katman arasında katman CE	28,30	

Çizelge 4.17. (Devam) Bazı tabakalı ahşap kompozit panel ortalama VD değerleri

Kavak Kontraplak	17,65	Bal, (2017)
Kavak Kontraplak + alt üst CE	17,99	
Kavak Kontraplak + alt üst 1+1 CE	20,06	
Kavak Kontraplaktüm ara katmanlar CE	20,14	

Çizelge 4.17’de ağaç türü, güçlendirme malzemesi çeşidi, tabaka kombinasyonu vb. üretim parametreleri değiştirilerek farklı vida çekme direnci elde edildiği görülmektedir. Güçlendirme malzemesi kullanılarak yapılan çalışmalarda masif malzemeye göre %41, LVL’ye göre %29 a varan iyileşme olduğu görülmektedir. Üretilen GTAKP’nin VD’leri 32,21 - 71,50 N/mm² arasında bulunmuştur. Bu sonuç GTAKP vida direncinin Çizelge 4.17’de görülen ikamesi olduğu düşünülen malzemelerden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlara ek olarak malzeme performans göstergesi olan mekanik özellikler ile bu özellikleri etkileyen kontrol faktörleri arasındaki sebep sonuç ilişkilerini belirlemek üzere regresyon analizleri yapılmıştır.

Regresyon modelini oluşturmak için belirtilen koşullar dikkate alındığında VD bağımlı değişken olarak etkilenen değişken olup, bağımsız değişkenler ise; AT, TT, TM, PS, PSC ve GM etkileyen değişkenlerdir. Yapılan çalışmada VD için ilgili faktörler arasındaki etkileşimden faydalananarak, regresyon analizi ile elde edilen matematiksel model (5.3) aşağıda sunulmuştur.

$$VD = 50.949 - 5.015 ATK1 + 5.015 ATK2 + 2.365 TTE - 2.365 TTP - 2.28 TM1 - 1.47 TM2 + 3.75 TM3 + 2.51 PS1 - 1.29 PS2 - 1.21 PS3 + 0.67 PSC1 - 2.07 PSC2 + 1.41 PSC3 + 2.00 GMC + 4.51 GMK - 6.50GMKO \quad (5.3)$$

*ATK1 Ağaç türü Kavak, ATK2 Ağaç türü Kayın, TTE Tutkal Türü Epoksi, TTP tutkal Türü Poliüretan, TM1 Tutkal Miktarı 100g/m², TM2 Tutkal Miktarı 150g/m², TM3 Tutkal Miktarı 200g/m²,PS1 Pres süresi 15 dk., PS2 Pres süresi 20 dk., PS3 Pres süresi 25 dk., PSC1 Pres sıcaklığı 100 °C, PSC2 Pres sıcaklığı 120 °C, PSC3 Pres sıcaklığı 140 °C,GMC Güçlendirme malzemesi cam elyaf, GMK Güçlendirme malzemesi karbon elyaf, GMK Kontrol grubu

$$R^2 = \%82,31$$

Eşitlik 5.2 incelendiğinde değişkenler arasında kuvvetli seviyeli ($R^2 = \%82,31$) bir ilişki olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel çalışmada bağımlı değişken olan vida çekme dayanımının belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülerek göz önünde bulundurulmuş bağımsız değişkenlerin (AT, TT, TM, PS, PSC, GM) doğru tahmin edildiği ve vida çekme direncindeki değişimi yaklaşık %70 oranında açıkladığı

anlaşılmaktadır. Bu durumda, regresyon modeli ile yapılan çalışmada iyi bir öngöründe Doğrulama deneyleri Taguchi yönteminde uygulanan son işlem basamağıdır. Taguchi optimizasyonu sonucu elde edilen optimum faktör parametreleri ile elde edilen deneysel sonucun %95 güven aralığında test edilmesi amacıyla doğrulama deneyleri yapılmaktadır. Vida çekme direnci üzerinde en büyük etkiye sahip faktörlerin sırasıyla ağaç türü ve tutkal türü olduğu belirlenmiştir. Tutkal miktarı, pres süresi, pres sıcaklığı ve güçlendirme malzemesi faktörlerinin ise bu özellikler üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığı görülmektedir. Bu bilgiler, GTAKP üretiminde vida çekme direncini iyileştirmek için ağaç türü ve tutkal türünün doğru seçiminin önemli olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.18’de optimum VD – S/G oranının oluşturan faktör ve faktör seviyeleri verilmiştir. Bu parametreler kullanılarak doğrulama deneyi yapılmıştır.

Çizelge 4.18. Optimum VD performansını sağlayan üretim parametreleri

AT	TT	TM (g/m ²)	PS (Dk.)	PSC (°C)	GM	DD - VD (N/mm ²)
Kayın	Epoksi	200	15	140	Karbon Elyaf	70,71

Çizelge 4.18 İncelendiğinde S/G oranları optimum faktör kombinasyonunu, Kayın ağaç türünde, 200g/m² epoksi tutkal kullanılarak 140 °C sıcaklıkta 15 dk. preslenmiş ve karbon elyaf ile güçlendirilmiş deney örneklerinde olduğu görülmektedir. Çizelge 4.14’da görülen deney faktörleri ve L₃₆ ortogonal dizin listesinde Çizelge 4.18’de belirtilen kombinasyon 21 numaralı üretim sırasında bulunmaktadır.

Bu değerler dikkate alındığında optimum seviyeler için ortalama doğrulama deneyi sonucu $VD_t = 70,71 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin doğruluğu için güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı maksimum ve minimum bir değerdir.

Eşitlik 3.6 ve 3.7 kullanılarak $CI = 3,22$ olarak hesaplanmıştır. VD için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu %95 güven aralığı dikkate alınarak $(70,71 \text{ (N/mm}^2) \pm 3,22)$ ya da $(67,48 - 73,93 \text{ (N/mm}^2))$ arası beklenmektedir. Optimum faktör seviyeleri dikkate alınarak yürütülen doğrulama deneyi VD değerleri sırasıyla 70,13; 69,97; 73,14; 76,06; 69,46; 69,97; 63,65; 79,90; 64,06; 70,71 (N/mm²) olarak elde edilmiş ve bunların ortalaması $70,71 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Doğrulama deneyleri ortalaması belirlenen güven düzeyinde gerçekleşmiştir.

4.2.4. Dinamik Eğilme Direnci ve Parametre Optimizasyonu

Dinamik eğilme direnci (DED) malzemelerin kullanım alanlarındaki servis verilebilirlik performansı açısından belirlenmesi gereken önemli dayanım karakteristiklerinden birisidir. Çizelge 4.19’da çalışmaya esas L36 ortogonal dizini kullanılarak üretilen malzemelerden hazırlanmış deney numunelerinden elde edilen ortalama DED ve bu değerler kullanılarak hesaplanan S/G oranları ve standart sapmaları verilmiştir.

Çizelge 4.19. DED aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.

SN	AT	TT	TM g/m ²	PS dk	PSC °C	GM	DED $\bar{X}$ (kJ/m ²)	DED S/G Oranı (dB)	SS
1	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	57,72	34,52	4,54
2	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	41,06	32,46	4,60
3	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	34,67	31,05	3,14
4	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	49,61	34,52	3,59
5	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	42,94	32,46	3,62
6	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	36,83	31,05	4,33
7	Kavak	Epoksi	100	15	120	Kontrol	41,39	32,34	3,90
8	Kavak	Epoksi	150	20	140	Cam	47,50	33,53	2,92
9	Kavak	Epoksi	200	25	100	Karbon	50,33	34,04	4,15
10	Kavak	Poliüretan	100	15	140	Karbon	75,42	37,55	4,87
11	Kavak	Poliüretan	150	20	100	Kontrol	50,00	33,98	4,60
12	Kavak	Poliüretan	200	25	120	Cam	51,94	34,31	2,20
13	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Cam	60,89	35,69	5,35
14	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Karbon	64,06	36,13	1,39
15	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Kontrol	48,11	33,64	6,03
16	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Karbon	62,11	35,86	3,87
17	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Kontrol	29,78	29,48	4,11
18	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Cam	55,67	34,91	4,90
19	Kayın	Epoksi	100	20	100	Kontrol	36,06	31,14	3,66
20	Kayın	Epoksi	150	25	120	Cam	44,61	32,99	4,06
21	Kayın	Epoksi	200	15	140	Karbon	35,94	31,11	5,68
22	Kayın	Epoksi	100	20	120	Kontrol	33,83	30,59	4,21
23	Kayın	Epoksi	150	25	140	Cam	47,00	33,44	6,00
24	Kayın	Epoksi	200	15	100	Karbon	38,22	31,65	5,64
25	Kayın	Epoksi	100	25	120	Cam	44,17	32,90	2,69
26	Kayın	Epoksi	150	15	140	Karbon	39,44	31,92	2,44
27	Kayın	Epoksi	200	20	100	Kontrol	28,28	29,03	2,39
28	Kayın	Poliüretan	100	25	120	Karbon	46,44	33,34	2,91
29	Kayın	Poliüretan	150	15	140	Kontrol	39,67	31,97	3,68
30	Kayın	Poliüretan	200	20	100	Cam	48,67	33,74	3,51

Çizelge 4.19. (Devam). DED aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.

31	Kayın	Poliüretan	100	25	140	Kontrol	36,61	31,27	3,49
32	Kayın	Poliüretan	150	15	100	Cam	48,89	33,78	3,86
33	Kayın	Poliüretan	200	20	120	Karbon	57,44	35,18	2,23
34	Kayın	Poliüretan	100	25	100	Karbon	41,44	32,35	4,54
35	Kayın	Poliüretan	150	15	120	Kontrol	37,17	31,40	4,60
36	Kayın	Poliüretan	200	20	140	Cam	45,00	33,06	3,14

*SN Sıra Numarası, *AT Ağaç Türü, *TT Tutkal Türü, *TM Tutkal Miktarı, *PS Pres Süresi, *PSC Pres Sıcaklığı, *GM Güçlendirme Malzemesi, * $\bar{X}$ Aritmetik ortalama, S/G Sinyal Gürültü oranı, SS Standart Sapma

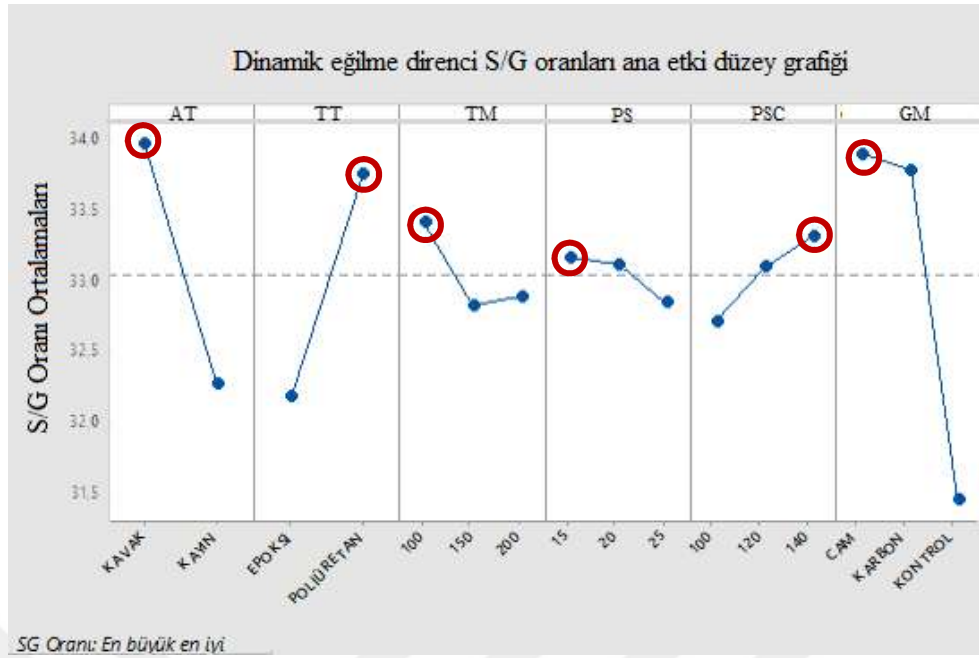
Çizelge 4.19’da görüldüğü üzere en yüksek DED (75,42 kJ/m²), 100 gr/m² poliüretan tutkalı, 140 °C pres sıcaklığı, 15 dk. pres süresi, karbon elyaf güçlendirme malzemesi ve Kavak kaplamalar kullanılarak üretilen örneklerden elde edilmiştir. En düşük DED ise (28,28 kJ/m²), 200 gr/m² epoksi tutkalı, 100 °C pres sıcaklığı, 20 dk pres süresi ile güçlendirme malzemesi kullanılmamış Kayın örneklerden üretilmiş deney numunelerinden elde edilmiştir.

DED üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini gösteren S/G oranları yanıt tablosu Çizelge 4.20’de görülmektedir.

Çizelge 4.20. DED için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.

Seviye	AT	TT	TM	PS	PSC	GM
1	33,97	32,18	33,41	33,16	32,71	33,90
2	32,27	33,76	32,83	33,12	33,10	33,78
3			32,89	32,85	33,32	31,44
Delta	1,70	1,58	0,59	0,32	0,60	2,45
Önem sırası	2	3	5	6	4	1

Çizelge 4.20 incelendiğinde üretilen GTAKP malzemenin DED üzerinde en fazla etkiye sahip olan faktörün kullanılan güçlendirme malzemesinin (GM) olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla ağaç türü (AT), tutkal türü (TT), pres sıcaklığı (PSC), tutkal miktarı (TM), pres süresi (PS) ve kontrol faktörleri izlemektedir. Kontrol faktörlerinin DED’ye göre optimum değerlerini gösteren S/G oranı için ana etki düzey grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. DED için S/G oranları ana etki düzey grafiği.

Şekil 4.7 incelendiğinde AT faktörü birinci seviyesi (Kavak), TT ikinci seviyesi (Poliüretan), TM birinci seviyesi 100 g/m², PS birinci seviyesi 15 dk., PSC üçüncü seviyesi 140 °C ve GM için birinci seviye olan cam elyaf dokuma kumaş kullanımı faktör seviyeleri optimum üretim parametre kombinasyonunu oluşturduğu görülmektedir.

DED için yapılan ANOVA sonuçları %95 güven düzeyinde ($p \leq 0,05$) değerlendirilmiştir (Çizelge 4.21).

Çizelge 4.21. DED için ANOVA sonuçları.

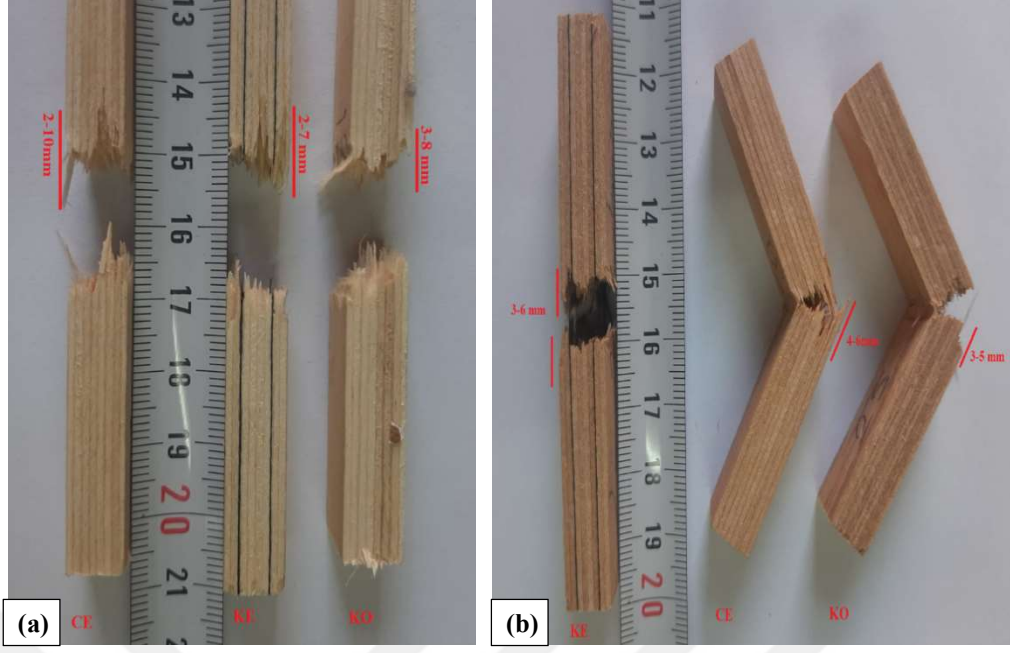
Kontrol Faktörü	Serbestlik Derecesi (df)	Katkı Düzeyi (%)	Kareler ortalaması (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F-Değeri	P-Değeri ($p \leq 0,05$)
AT	1	17,29	634,53	634,527	16,15	0,000
TT	1	16,96	622,46	622,456	15,84	0,001
TM	2	4,43	162,54	81,271	2,07	0,147
PS	2	1,82	66,7	33,348	0,85	0,440
PSC	2	0,45	16,5	8,248	0,21	0,812
GM	2	32,27	1184,13	592,063	15,07	0,000
Hata	25	26,77	982,29	39,292		
Toplam	35	100,00		42,967		

* $p \leq 0,05$: anlamlı, $p > 0,05$: anlamsız

Çizelge 4.21 incelendiğinde AT, TT ve GM'nin DED üzerinde istatistiksel olarak istatistiksel olarak anlamlı fark oluşturduğu ($p \leq 0,05$) ve etki düzeylerinin sırasıyla

%17,29; %16,96 ve %32,27 olduğu görülmektedir. Diğer kontrol faktörleri olan TM, PS ve PSC faktörlerinin ise DED üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadıkları görülmektedir. Tüm kontrol faktörleri dikkate alındığında ise DED üzerindeki toplam etki düzeylerinin yaklaşık %73 oranında olduğunu ve çalışmada kullanılan kontrol faktörlerinin yaklaşık %27 oranında DED üzerindeki etkileri açıklamadığını ya da kontrol edilemeyen çevresel faktörler tarafından etkilendiği söylenebilir.

AT'nin DED üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, Kavak ile üretilmiş örnekler Kayın ile üretilmiş örneklerden %19 daha yüksek DED'ne sahip olduğu görülmüştür. Efe (2020)'de yaptığı bir çalışmada DED testi sonrası test örneklerinin kırılma noktalarında meydana gelen kıymıklı veya kıymıksız kırılma şekillerinin, test edilen masif ağaç malzemenin tokluk özelliğini gösterdiğini bildirmiştir. TS ISO 13061-10 'a göre kırılma noktasında 3 mm'den daha uzun kıymık oluşması, malzemenin sünek özellik gösterdiğini; kıymık boyu 3 mm'den daha kısa olan kırılma şekilleri ise gevrek malzeme olduğunu belirtmektedir. Bal (2021b), yaptığı bir çalışmada, Çam ve Kavak odunu ile üretilmiş LVL örneklerini dinamik eğilme direnci testine tabi tutmuştur. Kavak kaplama ile üretilen numunelerin dinamik eğilme dirençleri Çam odunundan üretilen malzemelere göre daha yüksek çıktığı, gerekçe olarak yoğunluğu fazla olan (çam odununun) malzemenin daha gevrek olduğunu vurgulamış ve dinamik eğilme direnci testlerinde yoğunluğu düşük olan malzemelerin daha üstün performans sergilediğini bildirmiştir. Ayrıca malzeme içerisindeki nem içeriği, yıllık halka düzeni, lif yapısı gibi etkenlerinde dinamik eğilme direnci etkisi olduğunu bildirmiştir. Şekil 4.8'de görüleceği üzere, Kayın kaplamalar kullanılarak üretilen örneklerin kıymık boyları Kavaktan üretilenlere göre daha kısa olduğundan ötürü daha gevrek olduğu ve DED dayanımı az olduğu söylenebilir.



*Cam elyaf (CE), Karbon elyaf (KE), Kontrol (KO)

Şekil 4.8. DED testi kırılma görüntüleri Kavak (a), Kayın (b).

TT'nün DED üzerindeki etkileri incelediğinde PU ile üretilen örneklerin EPX ile üretilenlere göre yaklaşık %19 daha yüksek DED'e sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun EPX tutkalın kaplamalara daha iyi nüfuz etmesi (Şekil 4.3), buna bağlı olarak GTAKP'lerin kırılmalığının artmasından kaynaklanmış olabilir.

Dinamik eğilme direncinde en önemli faktör güçlendirme malzemesi olmuştur. Cam elyaf kullanılarak üretilen örneklerin kontrol grubu örneklerine göre DED %33,1, karbon elyaf ile güçlendirilmiş örneklerde ise %31,4 artış meydana gelmiştir. Bu durum incelendiğinde güçlendirme malzemesi kullanılarak (cam / karbon) üretilmiş örneklerin dinamik kuvvetlere karşı direncinin kontrol grubu örneklerine göre çok daha iyi (%32,25) performans gösterdiği belirlenmiştir. Bal ve Özyurt (2015) Kavak kaplama ve cam elyaf (500 g/m²) kullanarak ürettikleri güçlendirilmiş LVL'lerin dinamik eğilme direncinde kontrol örneklerine göre radyal yönde %113, teğet yönde yapılan testlerde ise %154'e varan düzeyde artış elde etmişlerdir. Ayrıca Bal (2014b) bir başka çalışmada cam elyaf ile güçlendirme işlemi uyguladığı kavak LVL'lerde %154'e varan DED artışı kaydettiğini bildirmiştir. Yapılan güçlendirme çalışmalarının üretilen malzemenin şok direncini güçlü bir şekilde pozitif yönde etkilediği ve daha güçlü hale getirdiği görülmektedir. Yapılan çalışma kapsamında elde edilen bulgular literatür ile uyum sağlamaktadır.

Düşük yoğunluğa ve düşük ekonomik değere sahip olan ağaç türlerinden elde edilen lamine malzemelerin güçlendirilmesi ile yüksek fiziksel ve mekanik performansa sahip

güçlendirilmiş LVL üretilerek ekonomik faydalar sağlanacağını bildirmişlerdir. Çizelge 4.22’de bazı tabakalı ahşap kompozit panellerin dinamik eğilme dirençleri ortalamaları verilmiştir.

Çizelge 4.22. Ahşap esaslı bazı malzemelerin DED değerleri.

MALZEME ÇEŞİDİ	DED (x) kJ/m ²	KAYNAK
Sarı Kavak	54,92	Kurul ve Görgün, (2022)
Isıl işlem Görmüş Sarı Kavak	38,25	
Kavak LVL	33,35*	Bal, (2014b)
Kavak + Karbon fiber LVL	85,26*	
Kavak LVL 7.5mm	43,15*	Bal, (2016b)
Kavak LVL 10 mm	38,25*	
Kavak LVL 12.5 mm	41,19*	
Kavak LVL 15 mm	42,17*	
Kavak LVL 17.5 mm	44,13*	
Kavak LVL 20 mm	50,01*	
Kayın masif	89,24	Çolak vd. (2007)
Kayın LVL	67,67	

* ile işaretlenmiş verilerin birimleri kgm/cm²’den kJ/m² birimine çevrildi

Çizelge 4.22’de ağaç türü, tabaka kombinasyonu vb. üretim parametreleri değiştirilerek farklı dinamik eğilme direnci elde edildiği görülmektedir. Çalışma kapsamında elede edilen DED verileri ortalamaları (Çizelge 4.19) hesaplandığında, kontrol grubunda 37,69 kJ/m² , karbon fiber ile güçlendirilmiş 49,57 kJ/m² , Cam elyaf ile güçlendirilmiş 50,14 kJ/m² olarak elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.22’de belirtilen çalışmalarda, farklı ahşap ve ahşap esaslı kompozit malzemelerin DED değerleri derlenmiştir. Üretilen GTAKP malzeme Çizelgede belirtilen malzemelere ikame bir üründür. Üretilen GTAKP’nin DED’leri 33,83 - 75,42 N/mm² arasında bulunmuştur. Bu sonuç GTAKP DED direncinin Çizelge 4.22’de görülen ve ikamesi olduğu düşünülen malzemelerden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Regresyon modelinde belirtilen koşullar dikkate alındığında DED bağımlı değişken olarak etkilenen değişken olup, bağımsız değişkenler ise; AT, TT, TM, PS, PSC ve GM etkileyen değişkenlerdir. Yapılan çalışmada dinamik eğilme direnci için ilgili faktörler

arasındaki etkileşimden faydalanarak, regresyon analizi ile elde edilen matematiksel model (5.4) aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned} DED = & 45,80 + 4,20 ATK1 - 4,20 ATK2 - 4,16 TTE + 4,16 TTP + 3,00 TM1 \\ & - 1,46 TM2 - 1,54 TM3 + 1,47 PS1 + 0,34 PS2 - 1,81 PS3 - 0,55 PSC1 \\ & - 0,41 PSC2 + 0,95 PSC3 + 4,34 GMC + 3,77 GMK - 8,10 GMKO \end{aligned} \quad (5.4)$$

*ATK1 Ağaç türü Kavak, ATK2 Ağaç türü Kayın, TTE Tutkal Türü Epoksi, TTP tutkal Türü Poliüretan, TM1 Tutkal Miktarı 100g/m², TM2 Tutkal Miktarı 150g/m², TM3 Tutkal Miktarı 200g/m², PS1 Pres süresi 15 dk., PS2 Pres süresi 20 dk., PS3 Pres süresi 25 dk., PSC1 Pres sıcaklığı 100 °C, PSC2 Pres sıcaklığı 120 °C, PSC3 Pres sıcaklığı 140 °C, GMC Güçlendirme malzemesi cam elyaf, GMK Güçlendirme malzemesi karbon elyaf, GMK Kontrol grubu

$$R^2 = \%74,20$$

Eşitlik 5.2 incelendiğinde değişkenler arasında orta ($R^2 = \%74,20$) seviyede bir ilişki olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel çalışmada bağımlı değişken olan dinamik eğilme direncinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülerek göz önünde bulundurulmuş bağımsız değişkenlerin (AT, TT, TM, PS, PSC, GM) doğru tahmin edildiği ve dinamik eğilme direncindeki değişimi yaklaşık %74 oranında açıkladığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, regresyon modeli ile yapılan çalışmada iyi bir öngörüle bulunulduğu ve çalışmanın realiteler ile paralel olduğu sonucuna varılmaktadır. Çizelge 4.23’de optimum DED – S/G oranını oluşturan faktör ve faktör seviyeleri verilmiştir. Bu parametreler kullanılarak doğrulama deneyi yapılmıştır.

Çizelge 4.23. Optimum DED performansını sağlayan üretim parametreleri.

AT	TT	TM g/m ²	PS Dk.	PSC °C	GM	DD - DED (N/mm ²) $\bar{X}$
Kavak	Poliüretan	100	15	140	Cam Elyaf	77,36

Çizelge 4.23’de belirtilen faktör kombinasyonunda üretilmiş numunelere dinamik eğilme direnci testi uygulanmıştır.

Bu değerler dikkate alındığında optimum seviyeler için ortalama doğrulama deneyi sonucu $DED_t = 77,36 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin doğruluğu için güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı maksimum ve minimum bir değerdir.

Eşitlik 3.6 ve 3.7 kullanılarak $CI = 3,53$ olarak hesaplanmıştır. DED için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu %95 güven aralığı dikkate alınarak $(77,36 \text{ (N/mm}^2) \pm$

3,53) ya da (73,82 – 80,88 (N/mm²)) arası beklenmektedir. Optimum faktör seviyeleri dikkate alınarak yürütülen doğrulama deneyi DED değerleri sırasıyla 77,36; 85,96; 66,73; 75,75; 73,65; 74,00; 79,25; 82,95; 80,50; 77,35 (N/mm²) olarak elde edilmiş ve bunların ortalaması 77,36 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Doğrulama deneyleri ortalaması belirlenen güven (73,82<77,35<80,88 (N/mm²)) düzeyinde gerçekleşmiştir.

Doğrulama deney sonucunda elde edilen verilerin aritmetik ortalaması en yüksek DED olan faktör kombinasyonundan (SN10) %2,5 daha yüksek bir değer elde edilmiştir.

4.2.5. Yapışma direnci ve Parametre Optimizasyonu

YD malzemelerin kullanım alanlarındaki servis verebilirlik performansı açısından belirlenmesi gereken önemli dayanım karakteristiklerinden birisidir.

Çizelge 4.24’de çalışmaya esas L₃₆ ortogonal dizini kullanılarak üretilen malzemelerden hazırlanmış deney numunelerinden elde edilen YD ve bu değerler kullanılarak hesaplanan S/G oranları ve standart sapmaları verilmiştir.

Çizelge 4.24. YD aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.

SN	AT	TT	TM g/m ²	PS dk.	PSC °C	GM	YD $\bar{X}$ (N/mm ²)	YD S/G (dB)	SS
1	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	4,044	12,42	0,69
2	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	4,227	12,56	0,69
3	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	4,077	12,21	0,73
4	Kavak	Epoksi	100	15	100	Cam	4,329	12,42	0,69
5	Kavak	Epoksi	150	20	120	Karbon	4,267	12,56	0,69
6	Kavak	Epoksi	200	25	140	Kontrol	4,078	12,21	0,73
7	Kavak	Epoksi	100	15	120	Kontrol	4,387	12,84	0,60
8	Kavak	Epoksi	150	20	140	Cam	5,077	14,11	0,57
9	Kavak	Epoksi	200	25	100	Karbon	4,393	12,85	0,46
10	Kavak	Poliüretan	100	15	140	Karbon	4,533	13,13	0,72
11	Kavak	Poliüretan	150	20	100	Kontrol	4,820	13,66	0,27
12	Kavak	Poliüretan	200	25	120	Cam	5,152	14,24	1,03
13	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Cam	5,190	14,30	0,72
14	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Karbon	5,000	13,98	0,81
15	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Kontrol	4,826	13,67	0,56
16	Kavak	Poliüretan	100	20	140	Karbon	5,319	14,52	1,00
17	Kavak	Poliüretan	150	25	100	Kontrol	4,853	13,72	0,73
18	Kavak	Poliüretan	200	15	120	Cam	5,372	14,60	0,60
19	Kayın	Epoksi	100	20	100	Kontrol	5,067	14,09	0,33

Çizelge 4.24. (Devam) YD aritmetik ortalamaları, S/G ve SS değerleri.

20	Kayın	Epoksi	150	25	120	Cam	5,400	14,65	0,98
21	Kayın	Epoksi	200	15	140	Karbon	5,532	14,86	0,69
22	Kayın	Epoksi	100	20	120	Kontrol	5,081	14,12	1,28
23	Kayın	Epoksi	150	25	140	Cam	5,450	14,73	0,78
24	Kayın	Epoksi	200	15	100	Karbon	5,649	15,04	0,55
25	Kayın	Epoksi	100	25	120	Cam	5,559	14,90	0,42
26	Kayın	Epoksi	150	15	140	Karbon	5,790	15,25	0,84
27	Kayın	Epoksi	200	20	100	Kontrol	5,174	14,28	1,51
28	Kayın	Poliüretan	100	25	120	Karbon	5,964	15,51	1,16
29	Kayın	Poliüretan	150	15	140	Kontrol	5,531	14,86	0,40
30	Kayın	Poliüretan	200	20	100	Cam	5,640	15,03	1,27
31	Kayın	Poliüretan	100	25	140	Kontrol	5,608	14,98	1,01
32	Kayın	Poliüretan	150	15	100	Cam	5,842	15,33	1,36
33	Kayın	Poliüretan	200	20	120	Karbon	6,062	15,65	0,36
34	Kayın	Poliüretan	100	25	100	Karbon	6,070	15,66	1,03
35	Kayın	Poliüretan	150	15	120	Kontrol	5,943	15,48	0,66
36	Kayın	Poliüretan	200	20	140	Cam	6,227	15,89	0,69

*SN Sıra Numarası, *AT Ağaç Türü, *TT Tutkal Türü, *TM Tutkal Miktarı, *PS Pres Süresi, *PSC Pres Sıcaklığı,

*GM Güçlendirme Malzemesi, * $\bar{X}$ Aritmetik ortalama, S/G Sinyal Gürültü oranı, SS Standart Sapma

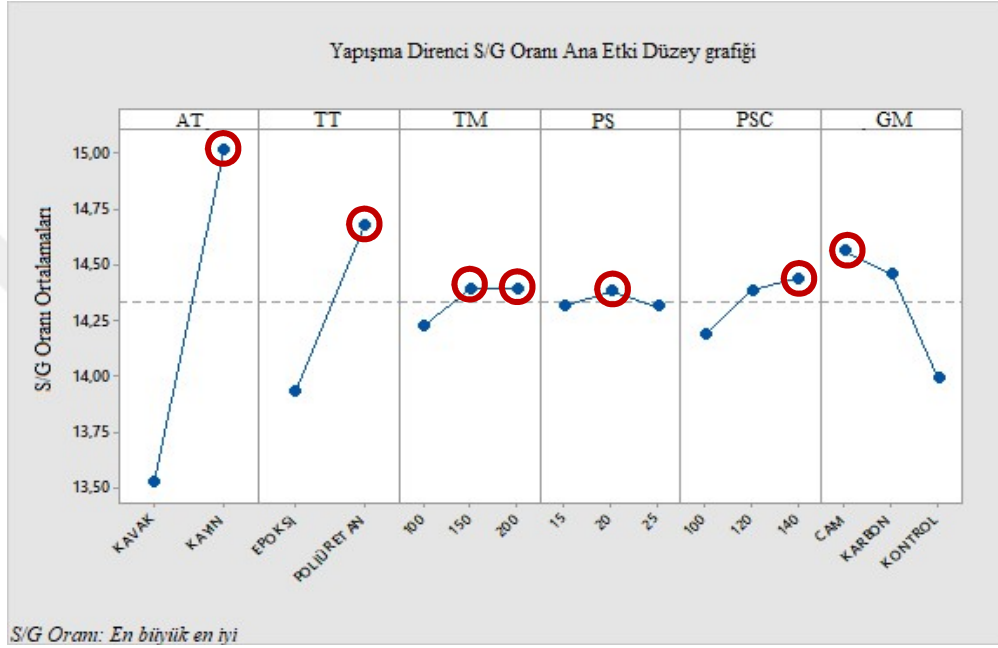
Çizelge 4.24’de görüldüğü üzere en yüksek YD (6,227 N/mm²) 200 gr/m² poliüretan tutkalı, 140 °C pres sıcaklığı, 20 dk pres süresi ile cam elyaf güçlendirme malzemesi kullanılarak, Kayın örneklerden üretilmiş malzemelerde elde edilmiştir. En düşük YD değeri ise (4,077 N/mm²) 100 gr/m² epoksi tutkalı, 100 °C pres sıcaklığı, 15 dk. pres süresi ile cam elyaf kullanılış ve kavak kaplamalar kullanılarak üretilmiş malzemelerden elde edilmiştir. ED üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini gösteren S/G oranları yanıt tablosu Çizelge 4.25’de görülmektedir.

Çizelge 4.25. YD için faktör önem düzeyleri ve S/G oranları yanıt tablosu.

Seviye	AT	TT	TM	PS	PSC	GM
1	13,52	13,93	14,23	14,32	14,19	14,56
2	15,02	14,68	14,39	14,38	14,38	14,46
3			14,39	14,31	14,44	13,99
Delta	1,49	0,75	0,17	0,07	0,25	0,57
Önem sırası	1	2	5	6	4	3

Çizelge 4.25 incelendiğinde üretilen GTAKP malzemenin YD üzerinde, kullanılan ağaç türü (AT)'nin en fazla etkiye sahip olan kontrol faktörü olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla tutkal türü (TT), güçlendirme malzemesi (GM) pres sıcaklığı (PSC), tutkal miktarı (TM) ve pres süresi (PS) kontrol faktörleri izlemektedir.

Kontrol faktörlerinin YD'ye göre optimum değerlerini gösteren S/G oranı için ana etki düzey grafiği Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. YD için S/G oranları ana etki düzey grafiği.

Şekil 4.9 incelendiğinde AT faktörü ikinci seviyesi (Kayın), TT ikinci seviyesi (Poliüretan), TM ikinci ve üçüncü seviyeleri (150 - 200 g/m²), PS ikinci seviyesi 20 dk., PSC üçüncü seviyesi 140 °C ve GM için birinci seviye olan cam elyaf dokuma kumaş kullanımı faktör seviyeleri optimum üretim parametre kombinasyonunu oluşturduğu görülmektedir.

YD için yapılan ANOVA sonuçları %95 güven düzeyinde ($p \leq 0,05$) değerlendirilmiştir. YD için elde edilen ANOVA sonuçları Çizelge 4.26'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.26. YD için ANOVA sonuçları.

Kontrol Faktörü	Serbestlik Derecesi (df)	Katkı Düzeyi (%)	Kareler ortalaması (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F-Değeri	P-Değeri ($p \leq 0,05$)
AT	1	61,27	8,6479	8,64793	6,26	0,000*
TT	1	21,17	2,9882	2,9882	0,85	0,000*
TM	2	0,43	0,0602	0,03008	4,58	0,622
PS	2	0,09	0,0130	0,00651	0,79	0,901
PSC	2	0,83	0,1176	0,05878	1,26	0,402
GM	2	5,16	0,7283	0,36414	1,32	0,008*
Hata	25	11,04	1,5587	0,06235		
Toplam	35	100,00				

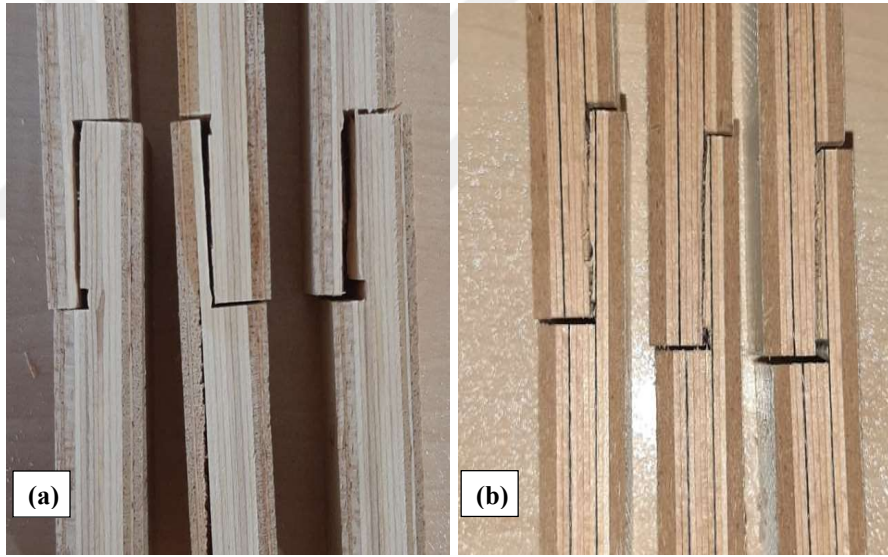
* $p \leq 0,05$: anlamlı, $p > 0,05$: anlamsız

Çizelge 4.26 incelendiğinde, AT, TT ve GM'nin YD üzerinde istatistiksel olarak anlamlı fark oluşturduğu ($p \leq 0,05$) ve etki düzeylerinin sırasıyla %61,27; %21,17 ve %5,16 olduğu görülmektedir. Diğer kontrol faktörleri olan TM, PS ve PSC faktörlerinin ise YD üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadıkları belirlenmiştir. Tüm kontrol faktörleri dikkate alındığında ise YD üzerindeki toplam etki düzeylerinin yaklaşık %89 oranında olduğunu ve çalışmada kullanılan kontrol faktörlerinin yaklaşık %11 oranında YD üzerindeki etkileri açıklamadığını ya da kontrol edilemeyen çevresel faktörler tarafından etkilendiği söylenebilir.

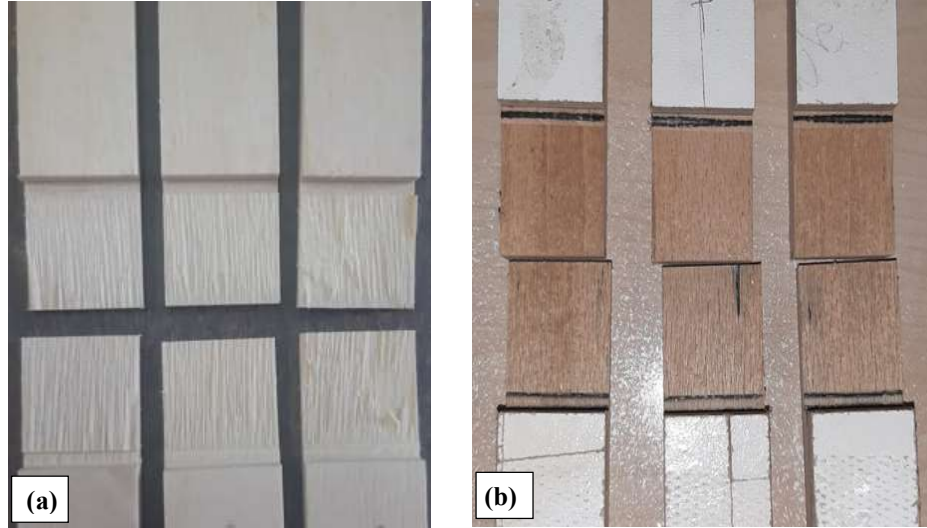
AT'nin YD üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, Kayın ile üretilen GTAKP örneklerinin Kavak ile üretilenlere göre daha yüksek bir YD'ne sahip olduğu görülmüştür. Kavak ile üretilen numunelerin yapışma direnci aritmetik ortalamaları 4,86 N/mm² iken kayın ile üretilen numunelerin yapışma direnci aritmetik ortalamaları 5,44 N/mm² olduğu ve %12 daha iyi yapışma sağlandığı görülmektedir. Deney örneklerinin incelendiğinde, %100 oranında odun kırılması gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.11). Bu durumda örneklerin YD'ni, kullanılan kaplamanın makaslama direncinin belirlediği söylenebilir. Keskin ve Togay (2003) yaptıkları çalışmada Kayın masif ve LVL'nin makaslama direncinin, Kavak masif ve LVL'ye göre %90'a varan oranlarda yüksek olduğu belirtilmiştir. Gaff vd. (2016), yaptıkları çalışmada kayın ile üretilen örneklerin yapışma mukavemetinin kavak ile üretilenlere göre %6 daha yüksek çıktığını ve bunun sebebinin ise kullanılan ağaç malzemedeki yoğunluk farkından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu bağlamda AT'ne bağlı olarak ortaya çıkan farkın literatür ile uyumlu olduğu ve yoğunluğu daha fazla olan ağacın YD'nin daha yüksek olduğu

söylenilmektedir.

TT'nin YD üzerindeki etkisi incelendiğinde EPX tutkalı ile yapıştırılan numunelerin YD aritmetik ortalamaları 4,66 N/mm² iken PU tutkal ile yapıştırılanların aritmetik ortalamalarının ise 5,64 N/mm² olduğu ve PU ile yapıştırılanların EPX'e göre %21 daha yüksek olduğu görülmüştür. Ahşap tutkallarının elastikiyet özellikleri ile ahşap malzemelerin elastikiyet özellikleri arasında büyük farklılıklar vardır. Bu fark yapıştırılan parçanın dış yükler sonucu deforme olması esnasında, iç gerilmelerin oluşmasına ve malzemenin daha düşük direnç özellikleri göstermesine sebep olabilmektedir (Dunky ve Niemz, 2002). Zeppenfeld ve Grunwald (2005), çift komponentli EPX tutkalları sert olarak, tek komponentli PU tutkalları ise elastik olarak sınıflandırmıştır. Buradan yola çıkarak daha elastik olan PU tutkalın ahşap malzemeyle daha uyumlu olabileceği, bu nedenle de PU kullanılarak üretilen GTAKP'lerin EPX kullanılarak üretilenlere kıyasla %12 daha yüksek YD oluşturduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.10.Yapışma test sonucu kopma görüntüsü (a) cam elyaf (b) karon elyaf (cumba).



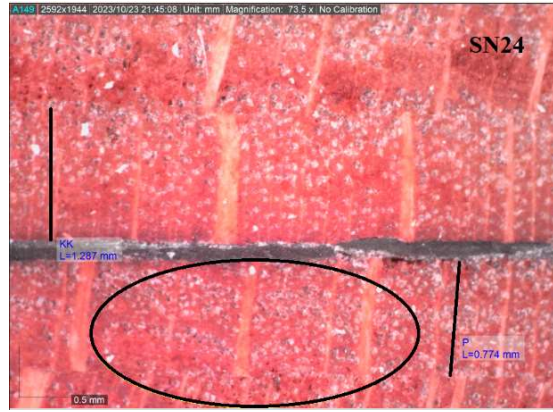
Şekil 4.11.YD test sonucu kopma görüntüsü (a) cam elyaf (b) karbon elyaf (yüzey).

Şekil 4.10, Şekil 4.11 incelendiğinde kopmaların ahşap malzemenin kırılması olarak gerçekleştiği, elyaf katmanlarının ahşap yüzeye, ahşabın kendi lif kopmasından veya ahşabın ahşap ile yapışmasından daha iyi yapışma gerçekleştiği görülmektedir.

Güçlendirme malzemesi ile ahşap kaplamaların birbirine yapıştırılması GTAKP üretimi için en kritik öneme sahiptir. Yapılan ön denemelerde birçok farklı yapıştırıcı türü ve farklı katkı maddeleri ve pres parametreler kullanılarak denenmiş ancak EPX ve PU haricinde kullanılan tutkallar ile yapıştırma başarısız olmasından dolayı GTAKP üretilmemiştir. GM açısından YD değerleri ele alındığında, en iyi yapışma direncini cam elyaf kullanılarak üretilmiş test örnekleri ($5,27 \text{ N/mm}^2$), sonrasında sırasıyla karbon elyaf ($5,23 \text{ N/mm}^2$) kullanılan örnekler ve güçlendirme malzemesi kullanılmamış kontrol grubu ($4,95 \text{ N/mm}^2$) örnekleri oluşturmaktadır. Deney örnekleri incelendiğinde, %100 oranında odun kırılması gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.11). Bu sonuçlar doğrultusunda çalışma kapsamında kullanılan EPX ve PU tutkallarının LVL'lerin cam ve karbon elyaf ile güçlendirilmesinde başarı ile kullanılabileceğini göstermektedir.

Cam ve karbon elyaf ile güçlendirilmiş GTAKP'lerin YD kontrol grubu örneklerine göre daha yüksek çıkmasının nedeni olarak; güçlendirme katmanında her iki yüze de tutkal sürülmesi sebebiyle GM bulunan katmanda tutkal miktarının iki katına çıkmasından kaynaklı olacağı düşünülmektedir. Literatürde, yapıştırıcı olarak kullanılan tutkalın ahşap kaplamadaki boşluk ve çatlaklara daha fazla nüfuz etmesi ve kırılma yüzeyindeki kaplama katmanının makaslama direncini arttırdığı bildirilmektedir (Onat ve Özdemir 2020). Şekil 4.12'de GM malzemesi kullanılan katmandaki tutkal penetrasyonu

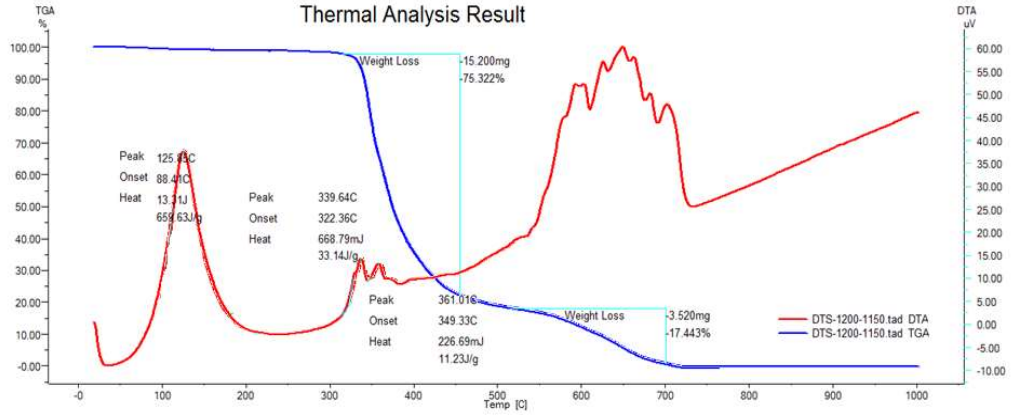
görülmektedir.



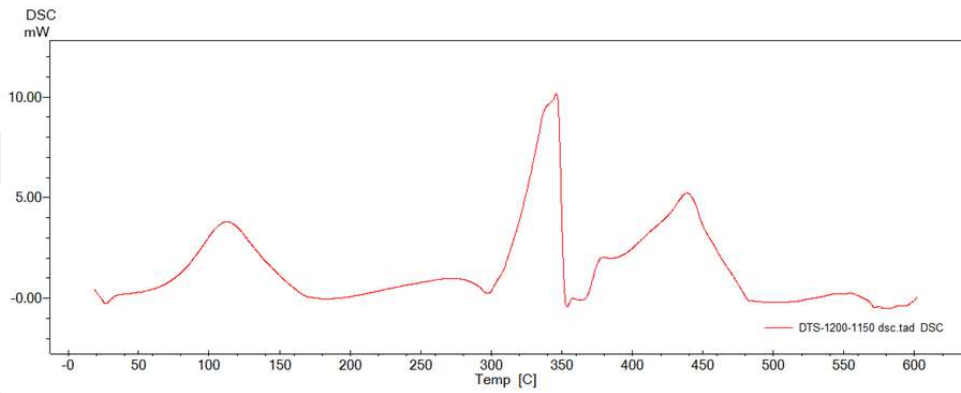
Şekil 4.12. GM kullanılan örneklerdeki tutkal penetrasyon görüntüsü.

PS ve PSC üretim faktörleri mekanik özelliklerin tümünde (ED, EEM, VD, DED, YD) istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşmamıştır ($p > 0,05$). Bu sonuca göre GTAKP üretiminde zaman ve enerji tasarrufu açısından en düşük pres süresi (15 dk.) ve en düşük pres sıcaklığı (100 °C) kullanılması önerilmektedir. PS'nin artması kürlenmenin tamamlanması açısından en son önem derecesine sahip olan bir parametre olarak görülmüştür. En iyi yapışma direncinin 20 dk. 'lık pres süresinde gerçekleştiği, 15 dk. ve 25 dk. 'lık pres sürelerinde ise yakın yapışma direnç değerleri ortaya çıktığı görülmektedir. Ortalama değerler açısından 15 dk. pres süresinde üretilen numunelerde 5,14 N/mm², 20 dk. pres süresinde üretilen numunelerde 5,17 N/mm², 25 dk. pres süresinde üretilen numunelerde 5,13 N/mm² olarak gerçekleşmiştir.

Yapılan çalışmada kullanılan tutkal türleri hâlihazırda oda sıcaklığına bağlı olarak kürlenen çift bileşenli epoksi esaslı reçine ve poliüretan esaslı nem kürlenmeli tutkal türleridir. Epoksi esaslı reçine ile yapılmış çalışmalar incelendiğinde sıcaklık artışına bağlı olarak kürlenmenin hızlandığı ancak belirli sıcaklıklardan sonra yapışma direnç değerlerinde düşüş olduğu bildirilmiştir (Matsui, 1990; Dodiuk ve Kenig 1994; Dutta ve Mosallam 2003; Czaderski vd. 2012; Singh vd., 2018).



Şekil 4.13. Epoksi tutkal termogravimetrik (TGA-DTA)analiz grafiği.



Şekil 4.14. Epoksi tutkal DSC analiz grafiği.

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde epoksi esaslı tutkala yapılan TGA-DTA ve DSC analiz sonuçlarında 125 °C sıcaklığa kadar yapıda herhangi bir bozunma olmadığını bu sıcaklıktan sonra hızlı bir bozunma gerçekleştiğini göstermektedir. Bu sebepten ötürü kullanılan yapıştırıcılarda 125 °C üzerinde bozulma meydana geldiğinden yapışma direncini olumsuz yönde etkilediği söylenebilmektedir. Ayrıca malzeme ağırlık kaybı 300 °C sıcaklıktan sonra gerçekleşmiş olup bu durum kullanılan tutkal miktarı açısından en iyi yapışmanın sağlandığı miktardan daha fazla miktarda reçine kullanılmasının fayda sağlamadığını da göstermektedir. Çizelge 4.27’de bazı tabakalı ahşap kompozit panellerin YD ortalamaları verilmiştir.

Çizelge 4.27. Bazı tabakalı ahşap kompozit panel ortalama YD değerleri

MALZEME ÇEŞİDİ	YD (x) N/mm ²	KAYNAK
Kavak LVL (FF) 3mm x 6 katman	3,37	Bal, (2014a).
Kavak LVL (FF) 3mm x 6 katman (200g/m ² Cam fiber)	2,81	
Huş LVL ÜF	3,0	Hogger vd., (2021).
Huş LVL FF	2,0	
Kontraplak (Kavak)	1,34	Öncel vd., (2019)
Kontraplak (Sarıçam - Kavak) FF	1,7	
Kontraplak (Gökmar - Kavak) FF	2,18	
Kontraplak (Kızılağaç - Kavak) FF	2,46	
Kontraplak Sarıçam MUF	2,44	Auriga vd., (2020).
Kontraplak Sarıçam (karbon elyaf ile güçlendirilmiş) MUF	1,12	
Kontraplak Kavak FF	2,61	Liu ve Guan, (2019)
Kontraplak Okaliptus FF	2,88	
Kontraplak Kavak + Karbon fiber FF	3,48	
Kontraplak Okaliptus + Karbon fiber FF	3,93	

Çizelge 4.27’de ağaç türü, tabaka kombinasyonu vb. üretim parametreleri değiştirilerek farklı YD elde edildiği görülmektedir. Çalışma kapsamında YD verileri kontrol grubunda 4,95 N/mm² , karbon fiber ile güçlendirilmiş 5,23 N/mm² , Cam elyaf ile güçlendirilmiş 5,27 N/mm² olarak elde edilmiştir. Ey yüksek YD değeri 6,22 N/mm² olarak kaydedilmiş olup literatür ile uyum sağladığı görülmektedir. Bu sonuçlara ek olarak malzeme performans göstergesi olan mekanik özellikler ile bu özellikleri etkileyen kontrol faktörleri arasındaki sebep sonuç ilişkilerini belirlemek üzere regresyon analizleri yapılmıştır.

Regresyon modelinde belirtilen koşullar dikkate alındığında YD bağımlı değişken olarak etkilenen değişken olup, bağımsız değişkenler ise; AT, TT, TM, PS, PSC ve GM etkileyen değişkenlerdir. Yapılan çalışmada dinamik eğilme direnci için ilgili faktörler arasındaki etkileşimden faydalanarak, regresyon analizi ile elde edilen matematiksel model (5.5) sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
YD = & 5,1537 - 0,4901 AT1 + 0,4901 AT2 - 0,2881 TTE \\
& + 0,2881 TTP - 0,0578 TM1 + 0,0297 TM2 + 0,0281 TM3 - 0,0056 PS1 \\
& + 0,0256 PS2 - 0,0200 PS3 - 0,0804 PSC1 + 0,0329 PSC2 + 0,0475 PSC3 \\
& + 0,1197 GMC + 0,0802 GMK - 0,1999 GMKO
\end{aligned} \quad (5.5)$$

*ATK1 Ağaç türü Kavak, ATK2 Ağaç türü Kayın, TTE Tutkal Türü Epoksi, TTP tutkal Türü Poliüretan, TM1 Tutkal Miktarı 100g/m², TM2 Tutkal Miktarı 150g/m², TM3 Tutkal Miktarı 200g/m², PS1 Pres süresi 15 dk., PS2 Pres süresi 20 dk., PS3 Pres süresi 25 dk., PSC1 Pres sıcaklığı 100 °C, PSC2 Pres sıcaklığı 120 °C, PSC3 Pres sıcaklığı 140 °C, GMC Güçlendirme malzemesi cam elyaf, GMK Güçlendirme malzemesi karbon elyaf, GMK Kontrol grubu

$$R^2 = \%87,79$$

Eşitlik 5.5 incelendiğinde değişkenler arasında kuvvetli ($R^2 = \%87,79$) seviyede bir ilişki olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel çalışmada bağımlı değişken olan yapışma direncinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülmektedir göz önünde bulundurulan bağımsız değişkenlerin (AT, TT, TM, PS, PSC, GM) doğru tahmin edildiği ve yapışma direncindeki değişimi yaklaşık %88 oranında açıkladığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, regresyon modeli ile yapılan çalışmada iyi bir öngöründe bulunulduğu ve çalışmanın realiteler ile paralel olduğu sonucuna varılmaktadır.

Sonuç olarak ağaç türü parametresi yapışma direnci üzerinde en büyük etkiye sahip faktör olarak belirlenmiştir. Farklı ağaç türleri, farklı yapısal özelliklere sahip olmaktadır ve tutkal ile yapışma yetenekleri değişebilir. Bu nedenle, GTAKP üretiminde kullanılan ağaç türünün seçimi, yapışma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir.

Tutkal türünün yapışma direnci üzerinde ikinci en önemli faktör olduğu görülmektedir. Kullanılan tutkalların kimyasal, hammadde, kürlenme, penetrasyon vb. özellikleri tümüyle birbirinden farklı olduğundan ötürü yapışma üzerinde fark oluşturmaları beklenen bir özelliktir.

Diğer önemli etkiye sahip olan faktör ise güçlendirme malzemesidir. Çalışma kapsamında kullanılan güçlendirme malzemesi yapışma sonucu açısından avantaj oluşturduğu söylenebilir. Pres sıcaklığı, pres süresi ve tutkal miktarı, yapışma direnci açısından belirgin bir fark yaratmamaktadır.

Bu bilgilere dayanarak, yapışma direnci açısından GTAKP üretimi en iyi şekilde optimize edilmek istendiğinde, ağaç türü, tutkal türü ve güçlendirme elemanına odaklanılması önemli olacaktır. Diğer parametrelerin ise yapışma direnci açısından GTAKP üretiminde daha az etkili veya daha az fark yaratabileceği söylenebilir.

Çizelge 4.28’de optimum YD – S/G oranın oluşturan faktör ve faktör seviyeleri verilmiştir.

Çizelge 4.28. Optimum YD performansını sağlayan üretim parametreleri.

AT	TT	TM (g/m ²)	PS (Dk.)	PSC (°C)	GM	DD - YD (N/mm ²)
Kayın	Poliüretan	200	20	140	Cam Elyaf	6,227

Çizelge 4.28’de görülen faktör seviyeleri L₃₆ ortogonal dizin listesinde (Çizelge 4.24) belirtilen 36 sıra numaralı kombinasyonda bulunmaktadır. Bu sebeple doğrulama deneyi amacıyla bu kombinasyonda belirtilen optimum parametreler kullanılarak yeniden üretim gerçekleştirilmiştir.

Bu değerler dikkate alındığında optimum seviyeler için ortalama doğrulama deneyi sonucu $DED_t = 6,31 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin doğruluğu için güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı maksimum ve minimum bir değerdir.

Eşitlik 3.6 ve 3.7 kullanılarak $CI = 0,46$ olarak hesaplanmıştır. YD için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu %95 güven aralığı dikkate alınarak $(6,31 \text{ (N/mm}^2) \pm 0,46)$ ya da $(5,85 - 6,77 \text{ (N/mm}^2))$ arası beklenmektedir. Optimum faktör seviyeleri dikkate alınarak yürütülen doğrulama deneyi YD değerleri sırasıyla 4,85; 5,70; 5,95; 6,30; 6,31; 6,50; 6,50; 6,60; 7,15; 7,25 (N/mm²) olarak elde edilmiş ve bunların ortalaması 6,31 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Doğrulama deneyleri ortalaması belirlenen güven $(5,85 < 6,31 < 6,77 \text{ (N/mm}^2))$ düzeyinde gerçekleşmiştir. Doğrulama deney sonucunda elde edilen verilerin aritmetik ortalaması en yüksek yapışma direnci olan faktör kombinasyonundan (SN36) %1,4 daha yüksek bir değer elde edilmiştir.

5. SONUÇ

Çalışma, farklı türde ağaç, tutkal ve güçlendirme malzemeleri kullanılarak değişen üretim koşullarında (pres sıcaklığı, pres süresi ve tutkal miktarı) GTAKP'nin optimum üretim parametrelerinin belirlenmesini ele almıştır. Cam/karbon elyaf dokuma kumaşın ahşaba yapışmasını belirleme adına ön deneme çalışmaları yapılmıştır. Ön deneme çalışmalarından elde edilen veriler çerçevesinde asıl çalışmanın sınırları belirlenmiştir.

Bu kapsamda ülkemiz yapı ve mobilya sektörlerinde yaygın olarak kullanılan iki farklı ağaç türü (Kavak, Kayın), farklı iklim ve çevre koşullarına dayanıklı iki farklı tutkal türü (nem kürlenmeli poliüretan, çift bileşenli epoksi), imalat sürecini optimize etmek amacıyla üç farklı tutkal gramajı (100,150, 200 g/m²), üç farklı pres süresi (15, 20, 25 dk.), üç farklı pres sıcaklığı (100, 120, 140 °C), yapı ve taşıyıcı elemanlarını güçlendirme amacıyla yüksek direnç değerlerine sahip olmasından ötürü tercih edilen iki farklı güçlendirme malzemesi (200 g/m² Cam veya Karbon elyaf dokuma kumaş) kullanılarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimi ölçmek maksadıyla kontrol grubu (Güçlendirme malzemesi kullanılmamış) panel örnekleride üretilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan faktör ve faktör seviyelerine (2²x3⁴) göre Taguchi deney tasarımı (L₃₆) oluşturulmuş ve deney örneklerinin üretimleri yöntem kısmında detaylı olarak anlatılmıştır.

GTAKP'nin ölçülen tüm mekanik özelliklerinde kullanılan elyaf türüne bağlı olarak kontrol grubuna göre direnç artışı kaydedilmiştir. Ortaya çıkan ürün (GTAKP) birçok ahşap esaslı kompozit yapı malzemesinden daha yüksek mekanik (ED, EEM, VD, DED, YD) özelliği karşıladığından ötürü halihazırda kullanılan malzemelere alternatif olarak bu ürünlere ikame olabileceği tespit edilmiştir.

Düşük yoğunluğa ve düşük ekonomik değere sahip olan ağaç türlerinden olan Kavak ile elde edilen lamine malzemelerin güçlendirilmesi ile mekanik özellikleri (ED, EEM, VD, DED, YD) iyileştirilmiş GTAKP üretimi sağlanmıştır.

Kavak ile üretilmiş GTAKP örneklerinin DED direnci, Kayın ile üretilmiş örekelerle göre daha yüksek değerde çıkmış olup, dinamik yüklere maruz kalan yapılarda tercih edilmesi önerilmektedir. Kontrol grubu Kayın ile üretilmiş GTAKP örneklerinin ED, EEM, VD ve YD değerleri Kavak ile üretilmiş örneklere göre daha yüksek değerde çıkmıştır. Güçlendirme malzemesi kullanılarak elde edilen veriler incelendiğinde ise her iki ağaç

türü içinde kontrol grubuna göre mekanik özelliklerde büyük oranda iyileşme sağlanabileceği tespit edilmiştir.

AT, TT, TM, PS, PSC ve GM faktör ve faktör seviyeleri GTAKP üretiminde mekanik özellikleri etkilediği belirlenmiştir. GTAKP'nin kullanım alanına bağlı olarak bu faktör ve faktör seviyelerinin doğru seçimi önem arz etmektedir. Örneğin ağaç malzemenin yoğunluğunun artmasına bağlı olarak bir çok mekanik etkiye karşı dayanımının arttığı bilinmektedir. Yoğunluğu düşük ağaç malzemelere FRP takviyesi yapılarak mekanik özelliklerinde iyileştirmeler sağlanabileceği görülmüştür.

Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan tutkal türleri ile üretimin, firma verileri baz alındığında poliüretan için 6-12 saat, epoksi için 12-24 saat zaman aldığı bilinmektedir. Bu çalışma sayesinde 15-25 dk. arasında optimum üretim parametreleri oluşturulmuştur. Bu sayede zaman, enerji, işçilik vb. birçok kalemde iyileştirme sağlanacağı öngörülmektedir.

Çizelge 5.1. Optimum ED, EEM, VD, DED ve YD S/G oranını oluşturan faktör kombinasyonu.

Optimum GTAKP Üretim Parametreleri						
DİRENÇ TESTİ	AT	TT	TM g/m ²	PS Dk.	PSC °C	GM
ED	Kayın	Epoksi	200	20-25	140	Karbon Elyaf
EEM	Kayın	Poliüretan	200	15	100	Karbon Elyaf
VD	Kayın	Epoksi	200	15	140	Karbon Elyaf
DED	Kavak	Poliüretan	100	15	140	Cam Elyaf
YD	Kayın	Poliüretan	150-200	20	140	Cam Elyaf

Çizelge 5.1 incelendiğinde çalışma kapsamında yapılan mekanik test sonuçlarına göre elde edilen optimum üretim parametreleri görülmektedir. Bu tablodaki optimum üretim parametrelerine göre üretilmiş örneklerin mekanik test sonuçları incelendiğinde ise eğilme dayanımı verilerine göre güçlendirme malzemesi olarak karbon elyaf dokuma kumaş kullanılmış deney örneklerinde kontrol grubu örneklerinin ortalama direnç değerlerine göre %26,3 üzerinde bir direnç artışı gerçekleşmiştir. Cam elyaf ile güçlendirilmiş numunelerde ise %20,4 oranında artış gerçekleşmiştir.

Elastikiyet modülü verileri değerlendirildiğinde güçlendirme malzemesi olarak karbon elyaf dokuma kumaş kullanılmış deney örneklerinde kontrol grubu örneklerinin ortalama direnç değerlerine göre %22,8 üzerinde bir direnç artışı gerçekleşmiştir. Cam elyaf ile

güçlendirilmiş numunelerde ise %7,9 oranında artış gerçekleşmiştir.

Vida tutma direnci verileri değerlendirildiğinde karbon elyaf dokuma kumaş ile güçlendirilmiş deney örneklerinde kontrol grubu deney örneklerine göre %24,74 cam elyaf ile güçlendirme işlemi yapılmış numunelerde ise %19,16 oranında daha yüksek vida tutma performansı görülmüştür.

Dinamik eğilme direnci verileri değerlendirildiğinde, cam elyaf dokuma kumaş ile güçlendirilmiş deney örneklerinde kontrol grubu deney örneklerine göre %33,0 karbon elyaf ile güçlendirme işlemi yapılmış numunelerde ise %31,5 oranında daha yüksek dinamik eğilme direnci performansı görülmüştür.

Yapışma direnci verileri değerlendirildiğinde, cam elyaf dokuma kumaş ile güçlendirilmiş deney örneklerinde kontrol grubu deney örneklerine göre %7,05 karbon elyaf ile güçlendirme işlemi yapılmış numunelerde ise %4,8 oranında daha yüksek yapışma performansı görülmüştür.

Elde edilen verilerde güçlendirme malzemesi kullanılarak üretilmiş tabakalı ahşap kompozit panellerin tümünde belirgin mukavemet artışları oluşmuştur. Bu artışta istatistiksel olarak anlamlı olan ($p<0,05$) faktörler çoğunlukla ağaç türü, tutkal türü, güçlendirme malzemesi ve tutkal miktarını oluşturmaktadır.

6. ÖNERİLER

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre cam veya karbon elyaf kullanılarak üretilmiş panellerin direnç değerlerinde büyük oranda artış gerçekleştiği görülmüştür. Kullanım alanında maruz kalınması muhtemel etkiler göz önünde bulundurularak Çizelge 5.1’de belirtilen kombinasyonlar ile güçlendirilmiş ahşap esaslı LVL kompozit panel üretilmesi önerilmektedir. Bu çalışma sonucunda GTAKP üretiminde farklı AT, TT, TM, PS, PSC ve GM’leri kullanılarak üretilen panellerin direnç değerlerinde önemli oranlarda artış ortaya çıkartılmıştır. PS ve PSC faktörlerinin GTAKP’lerin üretiminde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadığı ($p > 0,05$: anlamsız) görülmüş ve ileriki çalışmalarda değişen faktör seviyeleri kullanılarak üretimlerin yapılması önerilmektedir.

Elde edilen veriler çerçevesinde GTAKP’lerin eğilme dayanımında masif ahşaba göre ((Kayın 101,2 Kavak 82,4 N/mm² (Kasal vd. 2010)) Kayında 2,15 kat, Kavakta 2,03 kata kadar artış kaydedilmiştir. Üretilen GTAKP’lerin test örnekleri temel ahşap işleme makinalarında işlenmiş olup LVL/Kontraplak / Masif yerine alternatif olması açısından önemlidir. Bu sayede yüksek mukavemet gerektiren alanlarda (deniz araçları, çok katlı binalar, otomotiv sektöründeki kullanılan bazı parçalar, havacılık sanayii vb.) kullanımının diğer ahşap kompozit malzemelere alternatif olması beklenen bir özelliktir.

Kullanılan tutkal türlerinin uzun kürlenme periyodu (poliüretan > 8 saat, epoksi > 12-24 saat) sıcak pres koşullarında hızlandırılmış ve seri imalat koşullarına daha uygun hale getirilmiştir. Bu sayede yapışma performansının kabul edilebilir sınırlar içerisinde olarak seri imalata uygun pres üretim çevrim süreleri oluşturulmuştur. Hali hazırda çalışmada kullanılan her iki tutkal türü için de uzun üretim süreçleri kayda değer bir şekilde kısaltılması sağlanmıştır. Yapılan / yapılacak çalışmalarda sıcaklığın kullanılarak üretim süreçlerinin kısaltılması önerilmektedir.

Optimum işlem parametreleri ile üretilmiş GTAKP’nin test edilen tüm mekanik özelliklerinde artış elde edilmiştir. Malzemenin hâlihazırda kullanılan ahşap işleme makineleriyle işlenebilmesi (kesilebilmesi, rendelenebilmesi, zımparalanabilmesi vb.) ve en üst tabakaların ahşap olması sebebiyle üst yüzey işlemi uygulanabilmesi kullanım yeri açısından olumlu bir özelliktir.

Bu sayede gelecekte yapılması planlanan çalışmalardaki GTAKP optimum üretim parametreleri için bu çalışmadan elde edilen verilerin ışık tutması öngörülmektedir. Bu

çalışmaya ek olarak kullanılan ağaç türlerinin, kullanılan tutkal türlerinin, üretim çevrim sürelerinin değiştirilerek çalışmaların devam etmesi düşünülebilir. Ayrıca katman sayısı değiştirilerek daha kalın panel üretilmesi, katmanlarda kullanılan kaplama kalınlıklarını değişimi halinde oluşan mekanik özelliklerindeki değişimlerinde araştırılması literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Kullanılan faktörlere pres basıncı faktörü eklenmesi ve bu faktöre ait değişken parametrelerinde denenmesinin direnç değerleri açısından değerlendirilmesi literatüre katkı sağlayacaktır.

Her ne kadar yapılan bu çalışmada sağlıklı yapışma sağlanmış ve kullanılan tutkal miktarlarına bağlı olarak olumlu sonuçlar elde edilmiş olsa da, yapılacak ileri çalışmalarda tutkal kullanım miktarının daha fazla artırılmasının etkilerinin araştırılması faydalı olacaktır. Buna ek olarak; üretilen malzemelerde yoğunlaştırma nedeniyle kalınlık farklarının oluşması ve yapılan ön deneme çalışmalarında uygulanan yüksek basınç nedeniyle yaşanan üretim problemleri bu çalışmada pres basıncı kontrol faktörü olarak ele alınmamıştır. Dolayısı ile yapılacak ileri çalışmalarda farklı pres basıncı uygulanmasına yönelik bir kontrol faktöründe göz önünde bulundurulması faydalı olacaktır. Bu eksikliğin giderilmesinde yalnızca faktör sayısı değil aynı zamanda kullanılan faktör seviyelerinin de artırılması kontrol faktörlerinin sonuç değeri açıklama (katkı düzeyleri) oranlarını artırabileceği düşünülmektedir.

Çalışmada kapsamında kullanılan PS ve PSC faktörü yerine yüksek frekans jeneratörü ile çalışan preslerde de denemeler yapılarak imalat açısından kolaylık sağlayıp sağlamadığı değerlendirilebilir.

Günümüz mobilya ve yapılarındaki sıkça kullanılan bükme LVL üretiminde cam veya karbon elyaflar kullanılarak bükme ahşap endüstrisine katkıları araştırılması önem arz etmektedir. Bu sayede kullanım alanı genişletilmiş bir şekilde GTAKP günümüz gelişmiş endüstrisine seri imalat koşullarında üretilebilir bir malzeme olarak sunulabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca çalışma kapsamındaki testlere ek olarak balistik inceleme yapılarak can yeleği, kalkan, taşınabilir askeri kulübe (prefabrik) yapımı vb. amaçlar için kullanımında araştırılarak savunma sanayiine katkı sunulabilir.

7. KAYNAKLAR

- Agarwal, B. D., Broutman, L. J. ve Chandrashekhara, K. (2006). *Analysis and Performance of Fiber Composites*, 3. cilt, New York, A.B.D.: John Wiley & Sons.
- Akgül, T., Sarıbiyık, M., ve Apay, A. (2009), Karbon elyaf çubuklarla güçlendirilmiş ahşap boy birleşimlerinin eğilme davranışlarının incelenmesi. 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük.
- Altınok, M. (2002). Ahşap tutkalı birleşmelerde yapışma performansına sıcaklık artışının etkileri. *Politeknik Dergisi*, 5(4), 341-345.
- Anonim (1985). *Kayın*, Ormancılık Araştırma Enstitüsü Yayınları, Elkitabı Dizisi: 1, Muhtelif Yayınlar Serisi: 42.
- Anonim (2009). *Ormanlarımızda Yayılış Gösteren Asli Ağaç Türleri*, Orman Genel Müdürlüğü, s. 26.
- Anonim (2013). *Orman Atlası*, Orman Genel Müdürlüğü, s. 48.
- Anonim (2020). *2020 Türkiye Orman Varlığı*, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Orman Genel Müdürlüğü, s. 29.
- Anşin, R., ve Özkan, Z. C. (1993). Tohumlu bitkiler (Spermatophyta) odunsu taksonlar. *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi Yayınları*, (167).
- Arı A. ve Önder H., (2013). Farklı veri yapılarında kullanılacak regresyon yöntemleri, *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 28(3), 68–174.
- As N., ve Büyüksarı Ü., (2010). Masif ağaç malzemenin bükülmesi. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 60(1), 29-37.
- Ashori, A. (2008). Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries. *Bioresource technology*, 99(11), 4661-4667.
- Aslan, S. (1994). *Ağaç Dendrolojisi ve Odun Anatomisi*, Hacettepe Üniversitesi Mesleki Teknoloji Yüksek Okulu Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü.
- Atkinson, A., Donev, A., ve Tobias, R. (2007). *Optimum Experimental Designs, with SAS*, Oxford, İngiltere: OUP Oxford.
- Auriga, R., Gumowska, A., Szymanowski, K., Wronka, A., Robles, E., Ocipka, P., ve Kowaluk, G. (2020). Performance properties of plywood composites reinforced with carbon fibers. *Composite Structures*, 248, 112533.
- Aydın, M. ve Ciritcioğlu, H. H. (2022). Comparative study of destructive, nondestructive, and numerical methods on the determination of moisture-dependent shear moduli of calabrian pine, *Materials Evaluation*, 80(5), 32-41.
- Ayrılmış, N., Ulay G., Bağlı E. F., ve Özkan, İ. (2015). Ahşap sandviç kompozit levhaların yapısı ve mobilya endüstrisinde kullanımı. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 15(1), 37-48.
- Bal B., C ve Bektaş İ. (2018), Odunun yoğunluğu ile bazı mekanik özellikleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi üzerine bir araştırma, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 51-61.

- Bal, B. C. (2014a). Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glass fiber. *Construction and Building Materials*, 51, 9–14.
- Bal, B. C. (2014b). Some physical and mechanical properties of reinforced laminated veneer lumber. *Construction and Building Materials*, 68, 120-126.
- Bal, B. C. (2016a) The effect of the type of combination on the screw and nail withdrawal strength of eucalyptus and poplar LVL. *International Forestry Symposium (IFS 2016)*, Kastamonu, Türkiye.
- Bal, B. C. (2016b). The effect of span-to-depth ratio on the impact bending strength of poplar LVL. *Construction and Building Materials*, 112, 355-359.
- Bal, B. C. (2017). Screw and nail holding properties of plywood panels reinforced with glass fiber fabric. *Cerne*, 23, 11-18.
- Bal, B. C. (2021a). Cam elyaf file ile güçlendirilen tabakalı kaplama kerestenin (TKK) bazı mekanik özellikleri üzerine bir araştırma. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 174-182.
- Bal, B. C. (2021b). Effect of span length on the impact bending strength of Poplar and Pine woods. *BioResources*, 16(2), 4021.
- Bal, B. C., Bektaş İ., ve Kaymakçı, A., (2012), Toros sedirinde genç odun ve olgun odunun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 17–27.
- Bal, B. C., Özdemir, F., ve Altuntaş, E. (2013). Masif ağaç malzeme ve tabakalı kaplama kerestenin vida tutma direnci üzerine karşılaştırmalı bir çalışma. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 9(2), 14-22.
- Bal, B. C., ve Bektaş, İ. (2014). Some mechanical properties of plywood produced from eucalyptus, beech, and poplar veneer. *Maderas: Ciencia y tecnología*, 16(1), 99-108.
- Bal, B. C., ve Bektaş, İ. (2018). Odunun yoğunluğu ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 51-61.
- Bal, B. C., ve Efe, F. T. (2015). Tabakalı kaplama kerestenin bazı vida dirençleri üzerine cam elyaf dokuma ile güçlendirmenin etkisi. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 11(2), 40-47.
- Bal, B. C., ve Özyurt, H. (2015). Cam elyaf dokuma ile güçlendirilmiş tabakalı kaplama kerestenin bazı teknolojik özellikleri, *Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences*, 18(1), 9-16.
- Başol , G. (2019). *Araştırmacılar İçin İstatistik*, Ankara: Pegem Akademi.
- Bekhta, P., Salca, E. A., and Lunguleasa, A. (2020). Some properties of plywood panels manufactured from combinations of thermally densified and non-densified veneers of different thicknesses in one structure. *Journal of Building Engineering*, 29, 101116.
- Bektaş, İ., Güler, C., ve Baştürk, M. A. (2002). Principal mechanical properties of eastern beech wood (*Fagus orientalis* L.) naturally grown in Andırın northeastern mediterranean region of Turkey, *Turk Journal Agricultural Food*, 26, 147–154.

- Berglund, L. ve Rowell, R. (2005). *Wood composites*, In: Handbook of wood chemistry and wood composites, Florida, A.B.D.: CRC Press LLC., 279–301.
- Berthelot, J. M., ve Ling, F. F. (1999). *Composite materials*. mechanical behavior and structural analysis New York, A.B.D: Springer (c. 435).
- Birler, A. S., (2010). Türkiye’de Kavak Yetiştirme / Fidanlık - Ağaçlandırma - Koruma - Hasılat - Ekonomi - Odun özellikleri. Ed. M. Ercan, A. Karakaş, C. Fidan, F. Selek, T. Kahraman, *T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Kavak ve Hızlı Gelişen Orman Ağaçları Araştırma Enstitüsü: İzmit*.
- Bledzki, A. K., Sperber, V. E., ve Faruk, O. (2002). *Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers*. Shrewsbury, İngiltere: Smithers Rapra Publishing.
- Bodig, J. ve Jayne, B.A. (1993). *Mechanics of Wood and Wood Composites*, Florida, A.B.D.: Krieger Publishing Company.
- Borri, A., Corradi, M., ve Speranzini, E. (2013). Reinforcement of wood with natural fibers. *Composites Part B: Engineering*, 53, 1-8.
- Bozkurt Y., ve Erdin N. (2011). *Ağaç Teknolojisi Ders Kitabı*, İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları.
- Bozkurt, A., Y., Göker, Y., (1990). *Yonga Levha Endüstrisi Ders Kitabı*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi. Orman Fakültesi Yayınları, 263s.
- Bozkurt, Y. ve Göker, Y. (1996). *Fiziksel ve Mekanik Ağaç Teknolojisi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Basımevi ve Film Merkezi, 374s.
- Breyfogle, F. W. (2003). *Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods*. 2. Baskı, New York, A.B.D.: John Wiley ve Sons, Inc.
- Broughton, J. G., ve Hutchinson, A. R. (2001). Adhesive systems for structural connections in timber. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21(3), 177-186.
- Bulleit W. M. (1983). Reinforcement of wood materials: A Review, *Wood and Fiber Science*, 319-397.
- Cai, Z., ve Ross, R. J. (2010). Mechanical properties of wood-based composite materials. *Wood handbook-Wood as an engineering material*. Centennial edition. General Technical Report FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, EUA, 12.
- Canıyılmaz, E., ve Kutay, F. (2003). Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(3).
- Cevahir, A. (2017). *Glass Fibers*. In Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites (ss. 99-121). Ed. Seydibeyoğlu Ö.M., Mohanty, A. K., Misra, M. *Woodhead Publishing an imprint of Elsevier*.
- Chang, L., Guo, W. ve Tang, Q. (2017). Assessing the tensile shear strength and interfacial bonding mechanism of poplar plywood with high-density polyethylene films as adhesive, *BioResources*, 12(1), 571-585.
- Chang, L., Tang, Q., Gao, L., Fang, L., Wang, Z., and Guo, W. (2016). Fabrication and characterization of HDPE resins as adhesives in plywood, *European Journal of Wood and Wood Products*, 1-11.

- Choi, M. H., Byun, H. Y., ve Chung, I. J. (2002). The effect of chain length of flexible diacid on morphology and mechanical property of modified phenolic resin. *Polymer*, 43(16), 4437-4444.
- Ciritcioğlu H. H., Çiftçi S., (2019), Tabakalı ahşap kompozit malzeme üretiminde cam fiber (GFRP) ve karbon fiber (CFRP) kullanımı, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, (ss. 2210-2218).
- Corradi, S., Isidori, T., Corradi, M., Soleri, F., ve Olivari, L. (2009). Composite boat hulls with bamboo natural fibres. *International Journal of Materials and Product Technology*, 36(1-4), 73-89.
- Curling, S. ve Kers, J. (2017). Wood as bio-based building material-Panels, *Performance of Bio-Based Building Materials*, ed. Dennis Jones and Christian Brischke Baskısı. (ss. 52-61), Birleşik Krallık: Woodhead Publishing-An imprint of Elsevier.
- Czaderski, C. Martinelli, E. Michels, J. ve Motavalli, M. (2012). Effect of curing conditions on strength development in an epoxy resin for structural strengthening, *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 398-410,
- Çamlıbel, O., ve Akgül, M. (2021). Üre-formaldehit reçine mol oranının yüksek yoğunlukta lif levhanın (HDF) mekanik özellikleri üzerine etkileri. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 1-8.
- Çavuş, V. (2019). Mühendislik ürünü ağaç malzemelerde yükselen trend; çapraz tabakalanmış kereste. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 21(2), 560-569.
- Çiğdem, E., ve Perçin, O. (2022). Karbon fiber ve cam fiber ile güçlendirilmiş ısıtıl işlem uygulanmış lamine kaplama kerestelerin (LVL) bazı fiziksel ve mekanik özellikleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 653-664.
- Çolak, M., ve Değirmençtepe, S. (2020). İç ve dış mekanlarda ahşap malzemelerin mobilya ve yapı malzemesi olarak kullanımı. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9 (Özel Sayı), 190-199.
- Çolak, S., Çolakoğlu, G., ve Aydın, I. (2007). Effects of logs steaming, veneer drying and aging on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL). *Building and Environment*, 42(1), 93-98.
- Daoui, A., Descamps, C., Marchal, R., ve Zerizer, A. (2011). Influence of veneer quality on beech LVL mechanical properties. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 13(1), 69-83.
- Das, M., Sahu, S., ve Parhi, D. R. (2021). Composite materials and their damage detection using AI techniques for aerospace application: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 44, 955-960.
- Das, S. C., ve Nizam, M. (2014). Applications of fiber reinforced polymer composites (FRP) in civil engineering. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, 3(3), 299-309.
- Davalos, J. F. Qiao, P. ve Trimble, B. S. (2000). Fiber-Reinforced composite and wood bonded interfaces: Part 1. Durability and shear strength. *Journal of Composites Technology and Research*, 22(4), 224-231,
- Davis, G. (1997). The performance of adhesive systems for structural timbers, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 17(3), 247-255.

- De Melo, R. R., ve Del Menezzi, C. H. S. (2014). Influence of veneer thickness on the properties of LVL from Paricá (*Schizolobium amazonicum*) plantation trees. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(2), 191-198.
- Dizel, T., ve Uzun, İ. (2007). Yonga levha ile birleştirilen kenar masifinin yapışma direncine kullanılan tutkalin etkisi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 8(1).
- Dodiuk H. ve Kenig, S. (1994). Low temperature curing epoxies for structural repair, *Progress in Polymer Science*, 19(3), 439-467,
- Doğu, D., Koç, K. H., As, N., Atik, C., Aksu, B. ve Erdinler, S. (2001). Türkiye'de yetişen endüstriyel öneme sahip ağaçların temel kimlik bilgileri ve kullanıma yönelik genel değerlendirme, *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 51(2), 69-84.
- Dunky, M. (2003). *Adhesives in the wood industry*, Handbook of adhesive technology. New York, A.B.D.: 872-941
- Dunky, M. ve Niemz, P. (2002). *Holzwerkstoffe und leime: Technologie und Einflussfaktoren*, 727-767.
- Dutta P. K. ve Mosallam, A. (2003). A rapid field test method to evaluate concrete composite adhesive bonding. *International Journal of Materials and Product Technology*, 19(1-2), 53-67.
- Ebnesajjad, S. ve Landrock, A. H. (2015). *Adhesives Technology Handbook*. William Andrew.
- Efe H., Kasal, A., Demirci, S., İmirzi, H., Özen E. ve Dizel, T. (2011). Bazı lamine ağaç malzemelerden hazırlanmış T-tipi birleştirme elemanlarının çekme kuvveti performanslarının belirlenmesi. *Kastamonu University Journal of Forestry*.
- Efe, F. T. (2020). Japon akçaağaç odununun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 110-118.
- Erkan, N. (2021). Geçmişten günümüze Türkiye'deki endüstriyel ağaçlandırma çalışmalarının değerlendirilmesi. *Ormancılık Araştırma Dergisi*, 8(2), 108-116.
- Ersoy H. Y., (2001). *Kompozit malzeme*, Literatür yayıncılık.
- Fang, L., Chang, L., Guo, W. J., Ren, Y. P., and Wang, Z. (2013). "Preparation and characterization of wood-plastic plywood bonded with high density polyethylene film," *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(6), 739-746.
- Filiz M., Pınar U., ve Şahin H. (2011). Melamin, Üre Formaldehit Tutkalı, kızılçam ve çay atıkları ile elde edilen yonga levhanın bazı teknik özelliklerinin değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(2), 88-93.
- Forest Products Laboratory (US). (2010). Stark N,M., Cai Z., ve Carll C., *Wood handbook*: United States Department of Agriculture Forest Service, material (No. 72 S 253-280).
- Frihart, C. R. (2009). Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23(4), 601-617.
- Gaff, M., Ruman, D., Záborský, V., ve Borůvka, V. (2016). Impact bending strength as a function of selected factors. *BioResources*, 11(4), 9880-9895.

- Gardner, D. J., Blumentritt, M., Wang, L., ve Yildirim, N. (2015). Adhesion theories in wood adhesive bonding. *İçinde Progress in Adhesion and Adhesives*, 125-168.
- Gay, D. (2022). *Composite materials: design and applications*. CRC press.
- Gilfillan, J. R., Gilbert, S. G., ve Patrick, G. R. H. (2003). The use of FRP composites in enhancing the structural behavior of timber beams. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(15), 1373-1388.
- Goldhahn, C., Cabane, E., ve Chanana, M. (2021). Sustainability in wood materials science: An opinion about current material development techniques and the end of lifetime perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2206), 20200339.
- Gökçe, B., ve Taşgetiren, S. (2009). Kalite için deney tasarımı, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 71-83.
- Göker, G., ve As, N. (1990). Dallı Servi (*Cupressus sempervirens* var. *horizontalis* M.) Odununda Eğilmede Elastiklik Modülü. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 40(1).
- Guo, X., Lin, Y., Na, B., Liang, X., Ekevad, M., Ji, F., ve Huang, L. (2017). Evaluation of physical and mechanical properties of fiber-reinforced poplar scrimber. *BioResources*, 12(1), 43-55.
- Güller, B. (2001). Odun kompozitleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 2(1), 135-160.
- Günel, A. (2003). Regresyon Denkleminin Baarısını Ölçmede Kullanılan Belirleme Katsayısı ve Kitiği. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 4(2), 133-140.
- Hafeez, K., Rowlands, H., Kanji, G., ve Iqbal, S. (2002). Design optimization using ANOVA. *Journal of Applied Statistics*, 29(6), 895-906.
- Halliwell, S. (2000). *Polymer Composites in Construction*. BRE Center for building Fabric, CRC Ltd.
- He, G., ve Riedl, B. (2004). Curing kinetics of phenol formaldehyde resin and wood-resin interactions in the presence of wood substrates. *Wood Science and Technology*, 38, 69-81.
- Hematabadi, H., Behrooz, R., Shakibi, A., ve Arabi, M. (2012). The reduction of indoor air formaldehyde from wood based composites using urea treatment for building materials. *Construction and Building Materials*, 28(1), 743-746.
- Herajärvi, H., Jouhiaho, A., Tammiruusu, V., ve Verkasalo, E. (2004). Small-diameter Scots pine and birch timber as raw materials for engineered wood products. *International Journal of Forest Engineering*, 15(2), 23-34.
- Hogger, E. M., Van Herwijnen, H. W., Moser, J., Kantner, W. ve Konnerth, J. (2021). Systematic assessment of wheat extenders in formaldehyde-condensation plywood resins: part II—mechanical properties of plywood panels. *The Journal of Adhesion*, 97(14), 1310-1321.
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., ve Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite structures*, 262, 113640.

- Huang, C. L. (2010). *Delamination in wood, wood products and wood-based composites*. In: V. Bucur editor. *Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites*. Dordrecht, Hollanda: Springer, 215-236.
- Hunt, C. G., Frihart, C. R., Dunky, M., ve Rohumaa, A. (2018). Understanding wood bonds—going beyond what meets the eye: A critical review. *Reviews of Adhesion and Adhesives*, 6(4), 369-440.
- İc, Y. T., ve Yıldırım, S. (2012). Çok kriterli karar verme yöntemleriyle birlikte Taguchi yöntemini kullanarak bir ürünün tasarımının geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2), 447-458
- Janik, H., Sienkiewicz, M., ve Kucinska-Lipka, J. (2013). 9. Polyurethanes. İçinde *Handbook of thermoset plastics, Third Edition*. Elsevier Inc.
- Jariwala, H., ve Jain, P. (2019). A review on mechanical behavior of natural fiber reinforced polymer composites and its applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(10), 441-453.
- Johnson S. E., ve Kamke F. A. (1992). Quantitative analysis of gross adhesive penetration in wood using fluorescence microscopy. *The Journal of Adhesion*, 40(1), 47–61.
- Jung, Y. C., & Bhushan, B. (2006). Contact angle, adhesion and friction properties of micro-and nanopatterned polymers for superhydrophobicity. *Nanotechnology*, 17(19), 4970.
- Kalemtaş, A. (2014). Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech ve Composites*, 22, 18-30.
- Kamala, F.D., Sakagami, H. ve Matsumura, J. (2014). Mechanical properties of small clear wood specimens of *Pinus patula* planted in Malawi. *Open Journal of Forestry*, 4(1), 8-13.
- Kamke, F. A., ve Lee, J. N. (2007). Adhesive penetration in wood – A review. *Wood and Fiber Science*, 39, 205–220.
- Karaman, A., Güven, Ş., Yeşil, H., ve Yıldırım, M. N. 2017 Polivinilasetat (Pvac-D4), Polüretan (Pu-D4) ve epoksi tutkalları kullanılarak hazırlanan mobilya köşe birleştirmelerinde diyagonal çekme ve basınç kuvvetinin belirlenmesi, *Teknik Bilimler Dergisi*, 7(2), 26-36.
- Karaman, A., ve Yıldırım, M. N. (2018) Cam Elyaf Kumaş Destekli (GFRP) Lamine Kestane Malzemenin Eğilme Dayanımının Belirlenmesi, *International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies Proceedingsn (ISMSIT) 2018*, Kızılcahamam.
- Kari, R., Lappalainen, R., Tomppo, L., ve Yadav, R. (2022). Bond Quality of Poplar Plywood Reinforced with Hemp Fibers and Lignin-Phenolic Adhesives. *Composites Part C*, 100299.
- Karna, S. K., ve Sahai, R. (2012). An overview on Taguchi method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, 1(1), 1-7.
- Kasal, A., Efe H., ve Dizel T., (2010). Masif ve lamine edilmiş ağaç malzemelerde eğilme direnci ve elastikiyet modülünün belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 13(3) 183-190.
- Kasal, B., Andreas, H., John, K., and Peer, H. (2004). Laminated timber frames with composite fibre-reinforced connections. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 6(2), 84–93.

- Keskin, H., Togay, A. (2003), Doğu Kayını (*Fagus Orientalis* L.) ve Kara Kavak (*Populus Nigra* L.) Kombinasyonu İle Üretilmiş Lamine Ağaç Malzemelerin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri, *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 101-114
- Kılıç, S. (2013). Doğrusal regresyon analizi. *Journal of Mood Disorders*, 3(2), 90-92.
- Kibar, A. (2016). Süperhidrofobik ve hidrofobik yüzeyler üzerinde sıvı damlası gaz kabarcığı ve sıvı jeti dinamiğinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(7), 613-619.
- Koçer S., Diner G, Şener A., (2006). Samsun (I-77/51 P. Deltoides Bartr.) kavağı için hacim tablosu düzenlenmesi ve yoğunluk değerlerinin belirlenmesi. *Çevre, Tarım ve Orman Bakanlığı Teknik Bülten*, 204.
- Koman, S., Feher, S., Abraham, J., ve Taschner, R. (2013). Effect of knots on the bending strength and the modulus of elasticity of wood. *Wood Research*, 58(4), 617-626.
- Kretschmann, D. E. (2010). Mechanical Properties of Wood in *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. General technical report FPLGTR-190*. (Bölüm 05), Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- Krueger, G. P. (1973). Ultimate-strength design of reinforced timber: State of art. *Wood Science*, 6(2), 1975-176.
- Kollmann, F. F. P., Kuenzi, E. W., Stamm, A. J. (1975). Principles of Wood Science and Technology II: Wood Based Materials. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg.
- Kumar, R. N. ve Pizzi, A (2019). *Adhesives for Wood and Lignocellulosic Materials*. John Wiley ve Sons, Inc., Scrivener Publishing, Hoboken, A.B.D.
- Kumar, S., Satsangi, P. S., ve Prajapati, D. R. (2011). Optimization of green sand casting process parameters of a foundry by using Taguchi's method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55, 23-34.
- Kurtoğlu, A. (1984). Ağaç malzeme ağırlık ilişkileri. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, Seri B, 34(1), 150-163.
- Kurul, F., ve Görgün, H. V. (2022). Effect of thermal modification on some physical and mechanical properties of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*). *Drewno*, 65(209).
- Lazic', Z. R. (2004). *Design of Experiments in Chemical Engineering A Practical Guide*. New York, A.B.D.: Wiley-VCH.
- Liu, Y. T., Chang, W. C., ve Yamagata, Y. (2010). A study on optimal compensation cutting for an aspheric surface using the taguchi method. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 3, 40-48.
- Liu, Y., Guan, M., Chen, X., Zhang, Y., ve Zhou, M. (2019). Flexural properties evaluation of carbon-fiber fabric reinforced poplar/eucalyptus composite plywood formwork. *Composite Structures*, 224, 111073.
- Liu, Y., ve Guan, M. (2019). Selected physical, mechanical, and insulation properties of carbon fiber fabric-reinforced composite plywood for carriage floors. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(6), 995-1007.
- Ljungberg, L. Y. (2007). Materials selection and design for development of sustainable products. *Materials & Design*, 28(2), 466-479.

- Lopresto, V., Leone, C., & De Iorio, I. (2011). Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 717-723.
- Lunani, M., Nair, V. N., ve Wasserman, G. S. (1997). Graphical methods for robust design with dynamic characteristics. *Journal of Quality Technology*, 29(3), 327-338.
- Malkoçoğlu, A. (1994). ‘Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) odununun teknolojik özellikleri’, Doktora tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, Türkiye.
- Martin, R. H. (1992). Delamination failure in a unidirectional curved composite laminate. *Composite Materials: Testing and Design*, 10, 365-383.
- Matsui, K. (1990). Effects of curing conditions and test temperatures on the strength of adhesive-bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 10(4), 277-284.
- Mazumdar, S.K. (2002). *Composites manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. CRC Press LLC.
- Meekum, U., ve Mingmongkol, Y. (2011). Experimental design on laminated veneer lumber fiber reinforced composite: Processing parameters and its durability. In *16th International Conference on Composite Structures-ICCS* (c. 16).
- Mengeloğlu, F., ve Kurt, R. (2004). Mühendislik ürünü ağaç malzemeler 1 tabakalanmış kaplama kereste (TAK) ve tabakalanmış ağaç malzeme (TAM). *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 39-44.
- Miller, M. (2005). *Polymers in Cementitious Materials*. Shrewsbury, İngiltere: Smithers Rapra Publishing.
- Mindivan, F. ve Gürses, A. (2020). Resol tipi fenolik reçinelerin sentezi ve karakterizasyonu. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 407-417.
- Missanjo, E., ve Matsumura, J. (2016). Wood density and mechanical properties of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in Malawi. *Forests*, 7(7), 135.
- Mittal, K. L. (Ed.). (2015). *Progress in adhesion and adhesives*. John Wiley ve Sons.
- Modzel, G., Kamke, F. A., ve Carlo, F. (2011). Comparative analysis of a wood: adhesive bondline. *Wood Science and Technology*, 45(1), 147-158.
- Monteiro, S., Martins, J., Magalhães, F. D., ve Carvalho, L. (2018). Lightweight wood composites: challenges, production and performance. *Lignocellulosic Composite Materials*, 293-322.
- Moradpour, P., Pirayesh, H., Gerami, M., ve Jouybari, I. R. (2018). Laminated strand lumber (LSL) reinforced by GFRP; mechanical and physical properties. *Construction and Building Materials*, 158, 236-242.
- Nadir, Y., Nagarajan, P., ve Ameen, M. (2016). Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials*, 112, 547-555.
- Negro, F. (2022). Wood in sport equipment. Heritage, Present, Perspective; *Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari (DISAFA)*: Torino, İtalya, 190.
- Ogawa, H. (2000). Architectural application of carbon fibers development of new carbon fiber reinforced glulam. *Carbon*, 38(2), 211-26.

- OGM (2021), “Orman Genel Müdürlüğü İstatistikleri” Erişim 1 Nisan 2023. <https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane/resmi-istatistikler>
- Okut, G.K., ve Altınok, M. (2020). Doğal ahşap taneni ile modifiye edilmiş bazı ağaç türlerinde çürümeye karşı direncin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(2), 343-350.
- Onat, S. M., ve Özdemir, S. (2020). The effect of press temperature and duration on the bonding strength of american poplar laminated veneer lumber. *Journal of Bartın Faculty of Forestry*, 22, 3.
- Ozarska, B. (1999). A review of the utilisation of hardwoods for LVL. *Wood Science and Technology*, 33(4), 341-351.
- Öncel, M., Vurdu, H., Aydoğan, H., Özkan, O. E., ve Kaymakci, A. (2019). The tensile shear strength of outdoor type plywood produced from fir, alnus, pine and poplar wood. *Wood Research*, 64(5), 913-920.
- Örs, Y. ve Keskin H. (2001). *Ağaç Malzeme Bilgisi Ders Kitabı* Ankara, Türkiye: Atlas Yayın Dağıtım.
- Örs, Y., Özçifçi, A., ve Atar M., (1999). Bonding Strengthes of Klebit 303, Kleiberit 305.0 and Süper-Lackleim 308 Adhesives. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 23(9), 757-762.
- Örs, Y., Atar, M., ve Keskin, H. (2004). Bonding strength of some adhesives in wood materials impregnated with Imersol-Aqua. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24(4), 287-294.
- Özalp, M., Atılğan, A., Esen, Z., ve Kaya, S. (2009). Comparing the resistance and bending in the plywoods which each made with different glues. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (018), 99-104.
- Özartan G. ve Coşkun A. (2021) Ahşap Kullanımının Artırılması İçin Masif Ahşap Sektörü Durum Analizi, *Masif Ahşap Sektör Raporu*.
- Özdemir, S. (2020). ‘Bükülmüş tabakalı kaplama kereste üretiminde termo-mekanik yoğunlaştırma uygulanması ve mekanik özellikler üzerine etkisi’, *Doktora tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bartın, Türkiye.
- Pala, İ. (2015). Tekstil lifleri ile takviyelendirilmiş kompozit malzemelerin ürün tasarımında kullanılması, *Yüksek lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Parlak, S. (2023). Türk Yaylarının Yapımı ve Kullanılan Hayvansal Tutkalların Fonksiyonları. *Uluslararası Türk Kültür Coğrafyasında Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(1), 66-105.
- Perçin, O. (2016). Determination of screw withdrawal strength of heat-treated and reinforced laminated veneer lumber. *BioResources*, 11(1), 1729-1740.
- Perçin, O., Özbay, G., ve Ordu M., (2009). Farklı Tutkalarla Lamine Edilmiş Ahşap Malzemelerin Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (019), 109-120.
- Perçin, O., ve Uzun, O. (2022). Screw Withdrawal Strength of Heat-Treated and Laminated Veneer Lumber Reinforced with Carbon and Glass Fibers. *BioResources*, 17(2).

- Pizzi, A. ve Ibeh, C. C. (2014). Phenol – Formaldehydes. İçinde *Handbook of Thermoset Plastics, Third Edition*, (pp. 13-44). William Andrew Publishing.
- Pizzi, A., ve Mittal, K. L. (Eds.). (2003). *Handbook of Adhesive Technology Second Edition Revised and Expanded*. Marcel Dekker Inc..
- Pizzi, A., ve Mittal, K. L. (Eds.). (2018). *Handbook of Adhesive Technology Second Edition Revised and Expanded*. CRC press.
- Porteous, J., ve Kermani, A. (2013). *Structural Timber Design to Eurocode, 5*. Baskı, New York, A.B.D.: John Wiley ve Sons.
- Ross, P. J. (1996). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. 2. Baskı. New York, A.B.D.: Mc-Graw-Hill.
- Salthammer, T., Mentese, S., ve Marutzky, R. (2010). Formaldehyde in the indoor environment. *Chemical Reviews*, 110(4), 2536-2572.
- Samtaş, G. ve S. Korucu, S. (2019). Temperlenmiş alüminyum 5754 alaşımının frezelenmesinde kesme parametrelerinin Taguchi metodu kullanılarak optimizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 45–60.
- Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., ve Yogesha, B. (2015). Study on mechanical properties of natural - glass fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 2959–2967.
- Sari, K. A. M., Mat, S., & Badri, K. H. (2012). Palm-based lightweight concrete system. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1(4), 192-201.
- Saxena, P. K., Raut, K. G., Srinivasan, S. R., Sivaram, S., Rawat, R. S., & Jain, R. K. (1991). Polyurethane waterproofing coating for building applications. *Construction and Building Materials*, 5(4), 208–210.
- Schober, K., Uwe, A. M. H., Robert K., Robert, J., Qingfeng, X., ve Jian, F. C. (2015). FRP Reinforcement of Timber Structures. *Construction and Building Materials*, 97, 106–18.
- Singh, J. I. P. Singh, S. ve Dhawan, V. (2018). Effect of curing temperature on mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Journal of Natural Fibers*, 15(5), 687–696,
- Solmaz, M. Y., ve Turgut, A. (2009). Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Basit Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısı ve Bindirme Mesafesinin Bağlantı Mukavemeti Üzerine Etkisinin Deneyisel Olarak Araştırılması. *Firat University Journal of Engineering*, 21(2).
- Song, W., Xu, Z., ve Zhang, S. (2018). Using surface modified E-glass fiber cloths to enhance poplar laminated veneer lumber composites: Effects of modification conditions, gluing processes, hot-pressing parameters, and assembly patterns on physical-mechanical and interfacial properties. *BioResources*, 13(1), 597-631.
- Speranzini, E., ve Tralascia, S. (2010). Engineered lumber: LVL and solid wood reinforced with natural fibres. *Proceedings of the WCTE*, 1685-1690.
- Stark, M.N., Cai, Z. ve Carll, C. (2010), Wood-Based Composite Materials Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood–Nonwood Composite Materials, in *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. General technical report FPLGTR-190*. (Bölüm 11), Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.

- Steiger, R., Gehri, E., ve Widmann, R. (2006). Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam parallel to the grain. *Materials and Structures*, 40, 69–78.
- Stoeckel, F., Konnerth, J., ve Gindl-Altmutter, W. (2013). Mechanical properties of adhesives for bonding wood—A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 45, 32-41.
- Swamy, R. N., Jones, R., & Bloxham, J. W. (1987). Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates. *Structural Engineer* (London. 1924), 65(2), 59-68.
- Şirvancı, M. (1997). *Kalite İçin Deney Tasarımı*, İstanbul, Türkiye: Literatür Yayınevi.
- Tabarsa, T., ve Chui, Y. H. (1997). Effects of hot-pressing on properties of white spruce. *Forest Products Journal*, 47(5), 71.
- Taguchi, G. Chowdhury, S. and Y. Wu, Taguchi's (2005), *Quality Engineering Handbook*, 1. Baskı, Hoboken, New Jersey, Kanada: John Wiley ve Sons, ss. 501-617.
- Taheri, F., Nagaraj, M., ve Khosravi, P. (2009). Buckling response of glue-laminated columns reinforced with fiber-reinforced plastic sheets. *Composite Structures*, 88(3), 481-490.
- Tankut, N., & Sözen, E. (2014). Ülkemiz orman endüstrisinde mühendislik ürünü ağaç malzemeleri ve orman varlığına etkileri. *II. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu*, 795-800.
- TS 2470, (1976). Odunda fiziksel ve mekanik deneyler için numune alma metotları ve genel özellikler.
- TS EN 13446, (2005). Ahşap esaslı levhalar - Bağlayıcıların geri çıkma kapasitesinin tayini.
- TS EN 310 (1999). Ahşap esaslı levhalar-Eğilme direnci ve eğilme elastikiyet modülünün tayini.
- TS EN 323 (1999). Ahşap Esaslı Levhalar - Birim Hacim Ağırlığının Tayini.
- TS 3969 EN 314-1, (1998). Kontrplak - Kaplanmış-Yapışma Kalitesi, Bölüm 1 Deney Metotları.
- TS ISO 13061-10 (2021). Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri - Kusursuz küçük ahşap numunelerin Deney yöntemleri - Bölüm 10: Çarpmaya karşı eğilme mukavemetinin tayini.
- Tuçtaner, K., Tulukçu, M., & Toplu, F. (1994). Bazı kavak klonlarının büyümeleri ve teknolojik özellikleri üzerine araştırmalar. *Teknik Bülten*, 170.
- Tunçtaner, K., Talukçu, M., ve Toplu, F. (1994). Bazı kavak klonlarının büyümeleri ve teknolojik özellikleri üzerine araştırmalar. *Teknik Bülten*, 170.
- Turgut, K., Aras M., ve Çalışkan, Ö. (2017). Beton basınç ve eğilme dayanımlarına CFRP'nin etkisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 1-9.
- Ustabas İ., Gürbüz A., Zafer K., ve Deşik F. (2020). Betonda CFRP sargı uygulamasının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 921-930.

- Valle, Â. do, Moraes, P. D. de, Mantovani, G. Z. ve Fagundes, H. (2019). Influence of temperature on the adhesion of fibre reinforced polymers to timber surface. *Ambiente Construído*, 19(3), 25–38.
- Wang, J., Guo, X., Zhong, W., Wang, H., ve Cao, P. (2015). Evaluation of mechanical properties of reinforced poplar laminated veneer lumber. *BioResources*, 10(4), 7455-7465.
- Wang, B., ve Gao, H. (2021). *Fibre reinforced polymer composites*. İçinde Advances in Machining of Composite Materials: Conventional and Non-conventional Processes (ss. 15-43). Cham: Springer International Publishing.
- Wdowiak-Postulak, A. (2020). Natural fibre as reinforcement for vintage wood. *Materials*, 13(21), 4799.
- Wei, P. Wang, B. J. Zhou, D. Dai, C. Wang, Q. ve Huang, S. (2013). Mechanical properties of poplar laminated veneer lumber modified by carbon fiber reinforced polymer. *BioResources*, 8(4), 4883–4898.
- Wheeler, A. S., ve Hutchinson, A. R. (1998). Resin repairs to timber structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18(1), 1–13.
- Winistorfer, S. G., ve Steudel, H. J. (1997). ISO 9000: Issues for the structural composite lumber industry. *Forest Products Journal*, 47(1), 43.
- Yaltırık, F. ve Efe, A. (1994). *Dendroloji Ders Kitabı*. 2. Baskı. İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları.
- Yıldırım, M. N., Karaman, A., ve Zor, M. (2021). Bending characteristics of laminated wood composites made of poplar wood and GFRP. *Drvna Industrija*, 72(1), 3-11.
- Yıldırım, M. N., Tor, Ö., ve Karaman, A. (2018). The bending moment resistance of corner joints reinforced with glass fiber polymer. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 18(3), 350–56.
- Yıldız, O. ve Bircan, Ş. (2022). Batı Karadeniz kıyı bölgesi’nde yetişen Kayın (*Fagus orientalis* Lipsky) odununun fiziksel ve mekanik özelliklerinin yetişme ortamı değişkenleriyle ilişkisi, *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 8(2), 61-72.
- Zeppenfeld, G., Grunwald, D. (2005) *Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie*. 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co. KG, Leinfelden, Echterdingen.
- Zhang, P., ve Shijie, S. (2011). Strengthening mechanical properties of glulam with basalt fiber. *Advances in Natural Science*, 4(2), 130-133.
- Zhang, W., Yang, P., Cao, Y., Yu, P., Chen, M., ve Zhou, X. (2020). Evaluation of fiber surface modification via air plasma on the interfacial behavior of glass fiber reinforced laminated veneer lumber composites. *Construction and Building Materials*, 233, 117315.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Seymen ÇİFTÇİ
Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Kompozit Malzeme Teknolojileri ABD	Düzce Üniversitesi	2024
Y. Lisans	Mobilya ve Dekorasyon Öğretmenliği ABD	Düzce Üniversitesi	2013
Lisans	Mobilya ve Dekorasyon Öğretmenliği	Düzce Üniversitesi	2008
Lise	Mobilya ve Dekorasyon	Düzce Endüstri Meslek Lisesi	2002

YAYINLAR

- Çiftçi, S., Ciritcioglu, H. H., As, N., ve Tankut, N. (2022). Determination of epoxy resin usability for mass production of reinforced laminated veneer lumber. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 09544089221118217.
- Çiftçi S., Ciritcioğlu H.,H., Özdemir S., As., (2020). Cam elyaf katmanla güçlendirilmiş lamine panellerin yapışma dirençlerinin incelenmesi, *VI. Uluslararası Mobilya Kongresi*, (379-386), Trabzon,
- Ciritcioğlu, H. H., ve Çiftçi, S. (2019). Tabakalı Ahşap Kompozit Malzeme Üretiminde Cam Fiber (GFRP) ve Karbon Fiber (CFRP) Kullanımı, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*. Cilt II (Fen Bilimleri)
- Çiftçi, S. (2017). Sandalye üreten firmalar için değer analizi yöntemiyle yemek sandalyesi tasarımı. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 6(3), 1289-1299.
- Çiftçi, S., Ercan, E., Özkaya, K., ve İlçe, A. C. (2015). Ev mobilyaları üreten fabrikalar için laboratuvar planlaması. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 14(2), 696-715.
- Aytin, A., Çakıcıer, N., Çiftçi, S., ve Akter, M. (2021). Su bazlı vernik renk bariyerinin, doğal ahşap kaplamada renk değişimi ve sertlik üzerine etkisi. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 17(1), 62-75.