



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KRİYOJENİK İŞLEMİN SARIÇAM ODUNU MEKANİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

ERSİN PAMUKCU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
AĞAÇ İŞLERİ ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ HASAN HÜSEYİN CİRİTCİOĞLU**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KRİYOJENİK İŞLEMİN SARIÇAM ODUNU MEKANİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Ersin PAMUKCU tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU (Danışman)

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Öner ÜNSAL
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Doç. Dr. Fuat KARA
Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 19/08/2019

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.

19 Ağustos 2019

Ersin PAMUKCU

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU'na teşvik ve desteklerini benden esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Suat AYAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen İnönü Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesinde görev yapan meslektaşlarıma, her zaman yanımda yer alan Ramazan YORULMAZ arkadaşşıma ve sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

19 Ağustos 2019

Ersin PAMUKCU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. LİTERATÜR ÖZETİ.....	6
2. AĞAÇ MALZEME RUTUBET VE SICAKLIK İLİŞKİSİ.....	10
2.1. AĞAÇ MALZEME RUTUBET İLİŞKİSİ	10
2.1.1. Tam Kuru Rutubet Hali	10
2.1.2. Tam Yaş Rutubet Hali	10
2.1.3. Taze Rutubet Hali	10
2.1.4. Lif Doygunluğu Rutubet Hali	10
2.1.5. Hava Kuru Rutubet Hali	11
2.2. AĞAÇ MALZEME SICAKLIK İLİŞKİSİ.....	11
3. AĞAÇ MALZEME MODİFİKASYON YÖNTEMLERİ.....	14
3.1. KİMYASAL MODİFİKASYON	15
3.2. YÜZEY MODİFİKASYONU	15
3.2.1. Enzimatik Modifikasyon	16
3.3. EMPRENYE MODİFİKASYONU	16
3.4. TERMAL MODİFİKASYON.....	16
4. KRİYOJENİK İŞLEM	18
4.1. KRİYOJENİK SOĞUTMA	18
4.1.1. Kriyojenik Soğutma Nedir?	18
4.1.2. Kriyojenik Biliminin Tarihsel Gelişimi.....	18
4.2. KRİYOJENİK İŞLEMİN UYGULANMASI.....	20
4.3. KRİYOJENİK İŞLEMİN KULLANIM ALANLARI	21
4.4. KRİYOJENİK İŞLEM UYGULAMALARINDA KULLANILAN SOĞUTMA METODLARI.....	21
4.4.1. Doğrudan Soğutma	21
4.4.2. Dolaylı Soğutma	21

5. DENEY TASARIMI VE OPTİMİZASYON	22
5.1. DENEY TASARIMI ADIMLARI	22
5.2. TAGUCHİ YÖNTEMİ	23
5.3. TAGUCHİ YÖNTEMİNİN GELİŞİMİ.....	23
5.3.1. Taguchi Yöntemi Kayıp Fonksiyonu.....	24
5.4. VARYASYON ÖLÇÜMÜ	25
5.5. TAGUCHİ SİNYAL/GÜRÜLTÜ ORANLARI.....	26
5.5.1. Taguchi'nin Üretim Kalite Sistemi.....	26
5.5.2. On-line (Çevrim içi) Kalite kontrol	27
5.5.3. Of-line (Çevrim dışı) Kalite Kontrol	28
5.5.3.1. Sistem Tasarımı.....	28
5.5.3.2. Parametre Tasarımı	28
5.5.3.3. Tolerans Tasarımı.....	28
5.5.4. Robust Tasarımı	28
5.5.5. Değerlendirilecek Faktör ve Faktör Etkileşim Seçimi.....	29
5.5.6. Faktör Düzeylerinin Seçilmesi	29
5.5.7. Dikey Dizinler	30
6. MATERYAL ve YÖNTEM	31
6.1. MATERYAL	31
6.1.1. Ağaç Malzeme Sarıçam (<i>Pinus sylvestris L.</i>).....	31
6.1.1.1. Botanik Özellikleri ve Yayılışı	31
6.1.1.2. Makroskopik Özellikler	32
6.1.1.3. Mikroskopik Özellikler.....	32
6.1.1.4. Fiziksel ve Mekanik Özellikler	33
6.1.1.5. Kurutma, İşlenme, Dayanıklılık ve Emprenye Özellikleri	33
6.1.1.6. Kullanım Yerleri.....	33
6.1.2. Kriyojenik İşlem Ünitesi.....	33
6.1.3. Ünlversal Test Cihazı	34
6.2. YÖNTEM	35
6.2.1. Deney Tasarımı.....	35
6.2.2. Ağaç Malzemenin Hazırlanması.....	35
6.2.2.1. Liflere Dik Eğilme Direnci ve Eğilmede Elastikiyet Modülü	37
6.2.2.2. Liflere Paralel Kesme (Makaslama) Direnci	39
6.2.2.3. Liflere Paralel Basınç Direnci.....	40
6.2.2.4. Liflere Paralel Çekme Direnci.....	42
6.2.2.5. Brinell Sertlik.....	43
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
7.1. LİFLERE DİK EĞİLME DİRENCİ DENEYSEL OPTİMİZASYONU	47
7.1.1. Eğilme Direnci İçin Deneysel Sonuçların Yorumlanması	50
7.1.2. Eğilme Direnci İçin Varyans Analizi (ANOVA)	53
7.1.3. Eğilme Direnci İçin Regresyon Analizi	53
7.1.4. Doğrulama Deneyleri ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması	54
7.2. EĞİLMEDE ELASTİKİYET MODÜLÜ DENEYSEL OPTİMİZASYONU	56
7.2.1. Eğilmede Elastikiyet Modülü İçin Deneysel Sonuçların Yorumlanması	59
7.2.2. Eğilmede Elastikiyet Modülü İçin Varyans Analizi (ANOVA)	62
7.2.3. Eğilmede Elastikiyet Modülü İçin Regresyon Analizi	62
7.2.4. Doğrulama Deneyleri ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması	63
7.3. LİFLERE PARALEL KESME DİRENCİ DENEYSEL OPTİMİZASYONU	64
7.3.1. Kesme Direnci İçin Deneysel Sonuçların Yorumlanması.....	67

7.3.2. Kesme Direnci İçin Varyans Analizi (ANOVA)	70
7.3.3. Kesme Direnci İçin Regresyon Analizi.....	70
7.3.4. Doğrulama Deneyleri ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması	71
7.4. LİFLERE PARALEL BASINÇ DİRENCİ DENEYSEL OPTİMİZASYONU	72
7.4.1. Basınç Direnci İçin Deneysel Sonuçların Yorumlanması.....	75
7.4.2. Basınç Direnci İçin Varyans Analizi(ANOVA)	77
7.4.3. Basınç Direnci İçin Regresyon Analizi.....	78
7.4.4. Doğrulama Deneyleri ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması	79
7.5. LİFLERE PARALEL ÇEKME DİRENCİ DENEYSEL OPTİMİZASYONU	80
7.5.1. Çekme Direnci Deneysel Sonuçların Yorumlanması.....	83
7.5.2. Çekme Direnci İçin Varyans Analizi (ANOVA)	86
7.5.3. Çekme Direnci İçin Regresyon Analizi	86
7.5.4. Doğrulama Deneyleri ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması	87
7.6. BRİNELL SERTLİK DEĞERİNİN DENEYSEL OPTİMİZASYONU	88
7.6.1. Brinell Sertlik Değeri İçin Deneysel Sonuçların Yorumlanması	91
7.6.2. Brinell Sertlik Değeri İçin Varyans Analizi (ANOVA)	93
7.6.3. Brinell Sertlik Değeri İçin Regresyon Analizi	94
7.6.4. Doğrulama Deneyleri ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması	95
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	97
8.1. LİFLERE DİK EĞİLME DİRENCİ	97
8.2. EĞİLMEDE ELASTİKİYET MODÜLÜ	98
8.3. LİFLERE PARALEL KESME DİRENCİ.....	100
8.4. LİFLERE PARALEL BASINÇ DİRENCİ.....	101
8.5. LİFLERE PARALEL ÇEKME DİRENCİ.....	102
8.6. BRİNELL SERTLİK.....	104
8.7. ÖNERİLER.....	105
9. KAYNAKLAR	106
ÖZGEÇMİŞ	112

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1. Odun modifikasyon türleri.....	14
Şekil 4.1. 1900'lü yılların başında evlerde kullanılan buzdolabı.	19
Şekil 4.2. Kriyojenik işlemin tarihsel gelişimi.	20
Şekil 4.3. Doğrudan soğutma prensibi ile çalışan sıfır altı işlem ekipmanı şematik gösterimi.....	20
Şekil 4.4. Farklı yapıda sıfır altı işlem ekipmanları a) Önden yerleştirmeli b) Üstten yerleştirmeli c) Sıfır altı tünel soğutucu.....	21
Şekil 5.1. Bir sistem ya da sürecin genel modeli.....	22
Şekil 5.2. Taguchi kayıp fonksiyonu.....	25
Şekil 5.3. Taguchi kalite kontrol sistemi.....	27
Şekil 5.4. Etkileşim grafik gösterimi.....	30
Şekil 6.1. Bilgisayar kontrollü, doğrudan soğutma metodu ile çalışan Kİ sistemi.....	34
Şekil 6.2. Ünlversal test cihazı.....	34
Şekil 6.3. Ağaç malzemenin satın alma aşaması.....	35
Şekil 6.4. Deney örneklerin hazırlanması.....	36
Şekil 6.5. Kİ öncesi ağaç malzemenin paketlenip gruplandırılması.....	36
Şekil 6.6. Örneklerin iklimlendirme dolabında kondisyonlanması.....	37
Şekil 6.7. Deney örneklerinin distile su içerisinde bekletilmesi.....	37
Şekil 6.8. Liflere dik ED ve EEM a) Deney numune örneği b) Deney şematik gösterimi.....	38
Şekil 6.9. Liflere dik ED ve EEM testi.....	38
Şekil 6.10. Liflere paralel KD a) Deney numune örneği b) Deney şematik gösterimi...	39
Şekil 6.11. Liflere paralel KD testi.....	40
Şekil 6.12. Liflere paralel BD a) Deney numune örneği b) Deney şematik gösterimi...	41
Şekil 6.13. Liflere paralel BD testi.....	41
Şekil 6.14. Liflere paralel ÇD deney numune örneği.....	42
Şekil 6.15. Liflere paralel ÇD testi.....	42
Şekil 6.16. BS a) Deney numune örneği b) Deney şematik gösterimi.....	43
Şekil 6.17. BS testi.....	44
Şekil 7.1. Ortalamalar için ana etki grafiği (ED).....	49
Şekil 7.2. S/G oranları için ana etki grafiği (ED).....	50
Şekil 7.3. Kİ ve RM'nin ED üzerindeki etkisi.....	51
Şekil 7.4. Ortalamalar için ana etki grafiği (EEM).....	58
Şekil 7.5. S/G oranları için ana etki grafiği (EEM).....	59
Şekil 7.6. Kİ ve RM'nin EEM üzerindeki etkisi.....	60
Şekil 7.7. Ortalamalar için ana etki grafiği (KD).....	66
Şekil 7.8. S/G oranları için ana etki grafiği (KD).....	67
Şekil 7.9. Kİ ve RM'nin KD üzerindeki etkisi.....	68
Şekil 7.10. Ortalamalar için ana etki grafiği (BD).....	74
Şekil 7.11. S/G oranları için ana etki grafiği (BD).....	75
Şekil 7.12. Kİ ve RM'nin BD üzerindeki etkisi.....	76
Şekil 7.13. Ortalamalar için ana etki grafiği (ÇD).....	82

Şekil 7.14. S/G oranları için ana etki grafiği (ÇD).	83
Şekil 7.15. Kİ ve RM'nin ÇD üzerindeki etkisi.	84
Şekil 7.16. Ortalamalar için ana etki grafiği (BS).	90
Şekil 7.17. S/G oranları için ana etki grafiği (BS).	91
Şekil 7.18. Kİ ve RM'nin BS değeri üzerindeki etkisi.	92



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Nem içeriğinin, yaklaşık 20 °C'de ahşabın mekanik özellikleri üzerindeki ortalama etkileri.....	11
Çizelge 2.2. Farklı rutubet miktarına sahip ağaç malzemede sıcaklığın mekanik özellikler üzerindeki ortalama etkileri.....	12
Çizelge 6.1. Sarıçam odununun fiziksel ve mekaniksel özellikleri.....	33
Çizelge 7.1. Kİ uygulanmamış örneklerin farklı RM'ye göre mekanik özellikleri aritmetik ortalamaları.....	45
Çizelge 7.2. Deney faktörleri ve L ₉ ortogonal dizini.....	47
Çizelge 7.3. Eğilme direnci için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.....	48
Çizelge 7.4. ED için S/G yanıt tablosu.....	49
Çizelge 7.5. ED için ANOVA sonuçları.....	53
Çizelge 7.6. ED için Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	56
Çizelge 7.7. Eğilmede elastikiyet modülü için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.....	57
Çizelge 7.8. EEM için S/G yanıt tablosu.....	58
Çizelge 7.9. EEM için S/G oranı için ANOVA sonuçları.....	62
Çizelge 7.10. EMM için Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	64
Çizelge 7.11. Kesme direnci için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.....	65
Çizelge 7.12. KD için S/G yanıt tablosu.....	66
Çizelge 7.13. KD için S/G oranı için ANOVA sonuçları.....	70
Çizelge 7.14. KD için Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	72
Çizelge 7.15. Basınç direnci için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.....	73
Çizelge 7.16. BD için S/G yanıt tablosu.....	74
Çizelge 7.17. BD için S/G oranı için ANOVA sonuçları.....	78
Çizelge.7.18. BD için Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	80
Çizelge 7.19. Çekme direnci için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.....	81
Çizelge 7.20. ÇD için S/G yanıt tablosu.....	81
Çizelge 7.21. ÇD için S/G oranı için ANOVA sonuçları.....	86
Çizelge 7.22. ÇD için Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	88
Çizelge 7.23. Brinell serlik için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.....	89
Çizelge 7.24. BS değeri için S/G yanıt tablosu.....	90
Çizelge 7.25. BS için S/G oranı için ANOVA sonuçları.....	94
Çizelge 7.26. BS için Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	96

KISALTMALAR

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ANOVA	Analysis of Variance (Varyans Analizi)
BD	Basma Direnci
BS	Brinell Sertlik
CFRP	Fiber Takviyeli Plastik
Cryo-SEM	Kriyojenik Taramalı Elektron Mikroskobu
ÇD	Çekme Direnci
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
DT	Deney Tasarımı
ED	Eğilme Direnci
EEM	Eğilmede Elastikiyet Modülü
EPA	Çevre Koruma Ajansı
HK	Hava Kurusu
KD	Kesme Direnci
Kİ	Kriyojenik İşlem
kN	Kilo Newton
LD	Lif Yoğunluğu
MDF	Orta Yoğunluklu Lif Levha
Mpa	Megapaskal
OPK	Odun Polimer Kompozitleri
OSB	Yönlendirilmiş Yonga Levha
PMRA	Zararlılarla Mücadele Ajansı
RM	Rutubet Miktarı
SD	Suya Doymuş
S/G	Sinyal / Gürültü Oranı
SEM	Elektron Mikroskobu
TSE	Türk Standartlar Enstitüsü
XRD	X-ışını Difraksiyonu

SİMGELER

a	Deney örneğinin genişliği
b	Deney örneğinin kalınlığı
BD_t	Basınç direnci tahmin değeri
BS_t	Brinell sertlik tahmin değeri
CI	Güven aralığı
$ÇD_t$	Çekme direnci tahmin değeri
D	Brinell sertlik küresi çapı
d	Çelik kürenin örnekte açtığı çukurun çapı
D_0	Tam kuru haldeki yoğunluk
D_{12}	Hava kurusu haldeki yoğunluk
ED_t	Eğilme dayanımı tahmin değeri
EEM_t	Eğilmede elastikiyet modülü tahmin değeri
E-mod	Elastikiyet modülü
F	Uygulanan kuvvet
F_{max}	Kırılma anındaki maksimum kuvvet
h	Deney örneğinin yüksekliği
h	Enine kesit alanı
H_B	Brinell sertlik değeri
l	Makaslama yüzeyi uzunluğu
KD_t	Kesme direnci tahmin değeri
L_s	Dayanak açıklığı
n	Gözlem sayısı
n_{eff}	Etkin ölçülen sonuçlar
N	Noise (Gürültü)
P_{max}	Kırılma anında oluşan maksimum yük
r	Doğrulama deney sayısı
R	Aralık
R^2	Regresyon katsayısı
S	Standart sapma
S	Sinyal
$Tw//$	Makaslama direnci
Ve	Hatanın serbestlik derecesi
Vep	Hatanın varyansı
Y	Gözlenen değer
\bar{Y}	Gözlenen değerlerin ortalaması
β_r	Radyal yönde daralma yüzdesi
β_t	Teğet yönde daralma yüzdesi
β_v	Hacmen daralma yüzdesi
σ_b	Basınç direnci
$\sigma_ç$	Çekme direnci
$\sigma_ç//$	Liflere paralel çekme direnci
σ_e	Eğilme direnci
$\sigma_B//$	Liflere paralel basınç direnci
Δ_F	Elastikiyet bölgesindeki kuvvet farkı
Δ_f	Eğilme miktarı

ÖZET

KRİYOJENİK İŞLEMİN SARIÇAM ODUNU MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Ersin PAMUKCU

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin CİRİTÇİOĞLU

Ağustos 2019, 111 sayfa

Bu çalışmada, endüstride yaygın kullanım alanına sahip yerli ibrelili türlerimizden Sarıçam (*Pinus sylvestris L.*) odunu kullanılmıştır. Çalışmanın amacı farklı rutubet miktarlarına (RM) sahip (HK-Hava kurusu, LD-Lif doymunlu ve SD-Suya doymuş) ağaç malzemeye uygulanan kriyojenik işlemin (sığ (-40, -100 °C) – derin (-140 °C)) ağaç malzeme mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Çalışmanın nihai amacı ise ahşaba negatif sıcaklıkla muamele (kriyojenik işlem) edilmesinin ağaç malzeme mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde yeni bir modifikasyon yöntemi olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda test edilecek mekanik özellikler için ilgili standartlarda belirtilen ölçülerde deney numuneleri hazırlanmış ve hazırlanan numuneler çalışmada göz önünde bulundurulan rutubet miktarlarına kondisyonlanmıştır. Akabinde deney numuneleri 2 saat süre ile farklı kriyojenik işlem (Kİ) sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Uygulanan kriyojenik işlemin ağaç malzeme mekanik özellikleri üzerine etkisini belirlemek için tüm örnekler %65± 5 bağıl nem ve 20 ± 2 °C’de kondisyonlanmak suretiyle mekanik testlerin uygulanmasına hazır hale getirilmiştir. Çalışma kapsamında ağaç malzemenin mekanik özellikleri olarak, liflere dik eğilme direnci (ED), eğilmede elastikiyet modülü (EEM), liflere paralel kesme direnci (KD), basma direnci (BD), çekme direnci ve Brinell sertlik (BS) değerleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında ağaç malzeme mekanik özellikleri üzerinde etkili olan kontrol faktörleri (RM-Kİ) optimum seviyeleri ve bu faktörlerinin sonuç değer üzerindeki katkı düzeylerinin belirlenmesi amacıyla Taguchi L₉ (3²) ortogonal deney tasarımı kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu, ağaç malzemenin Kİ sıcaklıkları ile muamele edilmesi ile malzeme mekanik özelliklerden ED, EEM, BD ve ÇD değerlerini olumlu, KD değerinin olumsuz etkilendiği ve BS değerinin de ise kayda değer bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Ağaç malzeme rutubet miktarındaki artışa bağlı olarak tüm mekanik özelliklerin olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Kriyojenik işlemin metallerde olduğu gibi ahşap malzeme için de bir modifikasyon yöntemi olarak kullanılabilirliğini belirlemek için farklı ağaç türlerinde benzer çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Anahtar sözcükler: Ağaç modifikasyonu, Kriyojenik işlem, Rutubet miktarı, Taguchi

ABSTRACT

EFFECT OF CRYOGENIC TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF SCOTCH PINE

Ersin PAMUKCU

Duzce University

Institute of Science and Technology, Department of Wood Products Industrial
Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU

August 2019, 111 pages

In this study Scotch Pine (*Pinus sylvestris L.*) wood, one of our native conifer species, which is widely preferred in industry, was used. The aim of this study is to determine how cryogenic process (shallow (-40, -100 °C) - deep (-140 °C)) when applied to wood material which has different moisture contents (MC) (AD-Air dry, FS-Fiber saturated and WS-Water saturated) affects on the mechanical properties of wood material. The final goal of the study was to determine the usability of cryogenic treatment on wood as a new modification method for improving the mechanical properties of wooden materials. For this purpose, test samples were prepared for the mechanical properties to be tested in the dimensions specified in the relevant standards and the prepared samples were conditioned to the moisture content considered in the study. The test samples were then exposed to different cryogenic treatment (CT) temperatures for 2 hours. In order to determine the effect of cryogenic treatment on wood material's mechanical properties, all samples were prepared for mechanical tests by conditioning them at 65 ± 5 % relative humidity and 20 ± 2 °C temperature. Within the scope of the study, bending strength (BS), modulus of elasticity (MOE), shear strength (SS), compression strength (CS), tensile strength (TS) and Brinell hardness (BH) values were determined as mechanical properties of wood material. In this study, Taguchi L_9 (3^2) orthogonal experimental design was used to determine optimum levels of control factors (MC-CT) which affect the mechanical properties of wooden materials and their contribution levels on the result value. As a result of the studies, it was seen that BS, MOE, CS and TS values of the material were positively affected, the SS value was negatively affected and the BS value did not have a significant effect by treating wood material with CT temperatures. It was determined that all mechanical properties were adversely affected due to the increase in moisture content of wooden materials. Similar studies have been proposed for different wood species to determine the usability of the cryogenic treatment as a modification method for wood as well as metals.

Keywords: Cryogenic treatment, Moisture content, Taguchi, Wood modification

1. GİRİŞ

Ahşap malzeme, insanlık tarihi boyunca insanoğlunun çeşitli ihtiyaçlarını karşılamada en önemli doğal hammadde kaynaklarından birisi olmuştur. Ahşap malzemeye bu önemi kazandıran hususlar arasında, yaşam alanı içerisinde doğal olarak yetişmesi ve buna bağlı olarak kolay elde edilebilmesi, sahip olduğu elastikiyet, sertlik, mukavemet ve hafiflik gibi özelliklerinin yanında ayrıca ihtiyaca uygun biçimde istenilen şeklin verilebilmesi ve var olan özelliklerinin iyileştirilebilmesi sayılabilir [1].

Mobilyada mühendislik tasarımı, mobilya bileşenlerinin kullanıcılarına güvenilir hizmet verebilmesi açısından önemli bir etkiye sahiptir. Yapılması düşünülen mobilya sistemi veya mobilya birleştirmelerinin mühendislik kurallarına uygun tasarlanabilmesi için kullanılacak ahşap malzemenin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir [2].

Bu çalışmada, ahşabın kullanım yerlerinde karşılaşılabileceği olası rutubet miktarı (RM) ve aşırı iklim koşullarına maruz kalması durumunda mekanik özelliklerinde ortaya çıkabilecek olası değişimleri belirlemek amaçlanmıştır. Ahşap malzemenin içerdiği RM ve maruz kaldığı sıcaklığa göre mekanik özelliklerinin değiştiği bilinmektedir [3]–[5].

Ahşap malzeme doğal yapısı ve higroskopik özellikleri nedeniyle bulunduğu ortam ile rutubet alışverişinde bulunmaktadır. Ağaç malzemenin içerdiği RM, malzemenin hem fiziksel (boyutsal) hem de mekanik özelliklerinde değişime yol açmaktadır. Yeni kesilmiş bir ağaç bünyesinde %45 ile %200 civarında rutubet içerebilmektedir [6]. Bu nedenle ahşap malzemenin kullanım yerlerindeki performansının iyileştirilmesi, makinelerde kolay işlenebilmesi, ısı-elektrik yalıtımı, çivi-vida tutma, mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve boya vernik tatbik edebilme gibi pek çok işlemin nitelikli hale getirilebilmesi ahşap malzemenin kurutulması ile mümkün olmaktadır [1].

Ahşabın neredeyse tüm mekanik özelliklerinde rutubet miktarının (RM) yanı sıra sıcaklığın da doğrudan bir etkisi vardır. Özellikle lif doygunluğu (LD) rutubet miktarı (yaklaşık %30 RM) altına düştükçe ve sıcaklık azaldıkça ahşabın mekanik özelliklerinde artış görülmektedir [3], [5]. Ahşap malzeme sıcaklığa belirli bir süre maruz bırakılması ile hücre duvarı içindeki suyu kaybetmesi sonucu ahşabın hacminde ve kütlesinde azalma

meydana gelmektedir [7]. Ahşap malzemenin kurutulması işlemi, ısı işleminden farklı olarak malzemenin yapısal özelliklerini değiştirmeden yapısında bulunan suyu dışarı atma amacını taşır. Özellikle 65 °C'yi aşan yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz bırakılması ahşabın mukavemetinde düşmelere neden olmaktadır [8]. Isıl işlem olarak da bilinen 150 °C ve üstü sıcaklıkların, ahşaba belirli bir süre tatbik edilmesi, yapısında bulunan temel bileşiklerin yıkımlanmasına etki ettiğinden, ahşabın mekanik özelliklerinin düşmesine ve boyutsal kararlılığının artmasına neden olmaktadır. Buna paralel olarak yoğunluğunda da azalma meydana gelmektedir. Bu azalmanın ortaya çıkmasının nedeninin, ahşabın yapısında bulunan başta hemiseliloz olmak üzere, diğer yapı bileşenlerinin buharlaşıp uçucu ürünlere dönüşmesi ile ilgili olduğu bilinmektedir. Bu süreç, ahşap malzemenin daha az higroskopik yapıya dönüşmesi ve daha düşük denge RM'ye gelmesi ile noktalanmaktadır [9].

Odon modifikasyonu, odunun dezavantajlarını ortadan kaldırmak için kullanılan ve geçtiğimiz yüzyılda üzerinde çok sayıda araştırma yapılan ve halen de devam eden bir çalışma alanıdır. Odonun olumsuz özelliklerini en aza indirmek ya da iyileştirmek anlamına gelmektedir. Genellikle odunun boyutsal kararlılığını sağlamak ve çeşitli biyolojik zararlıların neden olduğu olumsuzluklara karşı dayanıklılık sağlamak için kullanılan yöntemlerdir [10].

Odon modifikasyon yöntemleri araştırmacılar tarafından farklı farklı sınıflandırılrsa da, genel olarak kabul gören odun modifikasyon yöntemlerini şu şekilde sınıflandırabiliriz.

- Kimyasal Modifikasyon,
- Yüzey Modifikasyonu,
- Emprenye Modifikasyonu,
- Termal Modifikasyon

Bunlardan kimyasal modifikasyon yöntemi, odun hücre çeperi polimerlerinde bulunan herhangi bir reaktif grup ile kimyasal madde arasında kovalent bağ oluşumuyla sonuçlanan reaksiyondur. Kimyasal modifikasyonun iki temel amacı vardır. Bunlar odunun çürümeye karşı direncini ve boyutsal kararlılığını artırmayı amaçlar [10].

Yüzey modifikasyon yönteminde ise, ahşap yüzeyin birkaç milimetre derinliğinin yoğunlaştırılması amacını taşır. Bu yöntem ile hacim kaybı minimize edilerek yüzey kalitesi artırılır. Bu yöntemde ahşap yüzey ısıtılır ve sıkıştırma işlemi yapılır [11].

Emprenye modifikasyonu ise, kimyasal bileşikler veya kimyasal maddeler ile odun hücre çeperini emprenye etme işlemidir. Emprenye modifikasyonunda temel prensip; hücre çeperinin bir kimyasal madde ile reaksiyona girerek biri birine bağlanmaları esasına dayanmaktadır [12].

Ahşabı yüksek sıcaklıklara maruz bırakmak suretiyle gerçekleştirilen termal modifikasyon yöntemi ise ısı işlem olarak anılan çevre dostu bir odun koruma yöntemidir. Isıl işlem, ahşap malzeme yapı maddesi olan hücre çeperinin polimer bileşiklerinin kimyasal kompozisyonunda geri dönüşümlümeç değişmelere yol açan fiziksel bir işlemdir. Bu metot da temel amaç, kimyasal reaksiyonların hızlandığı yaklaşık 150 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar ile ağaç malzemenin ısı ile muamele edilmesi prensibine dayanmaktadır [9].

Ahşabın yapısal özelliklerindeki değişim yalnızca yüksek sıcaklıklarda değil düşük sıcaklıklarda da ortaya çıkmaktadır. Ahşabın düşük sıcaklıklara maruz kalması (< 0 °C) sonucu ahşabın mekanik özelliklerinin artma eğiliminde olduğunu göstermektedir [4], [5], [13].

Yapılan literatür araştırmasında, ısı işlem üzerine birçok araştırma yapılmış ve ahşabın bazı fiziksel özelliklerini (boyutsal stabilite) geliştirebildiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, düşük sıcaklıkların (<0 °C) ahşap malzemelerin mekanik özelliklerine etkisini değerlendiren sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ahşap malzemeye yüksek sıcaklıkla muamele edilmesinin getirdiği en büyük olumsuzluk ağaç malzeme mekanik özelliklerinin olumsuz etkilenmesidir. Benzer şekilde uygulanan diğer modifikasyon yöntemlerinin de sağladıkları iyileştirmeler yanı sıra ortaya çıkan bazı olumsuzluklar bulunmaktadır. Bu nedenle uygulanan modifikasyon yöntemlerinin olumsuz yönlerinin giderilmesi amacıyla farklı modifikasyon yöntemleri kombine edilerek bu sorunun üstesinden gelinmeye çalışılmaktadır. Ayrıca bu olumsuzlukları içermeyen yeni modifikasyon yöntemi arayışları da günümüzün güncel konuları arasında yer almaktadır.

Bu nedenle çalışma kapsamında iki temel hedefe ulaşmak amaçlanmıştır. Bu hedeflerden ilki olarak ağaç malzemenin mekanik özellikleri üzerinde uygulanan farklı negatif sıcaklıkların (< 0 °C – kriyojenik işlem) ve ağaç malzeme rutubet miktarlarının etkilerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmanın nihai amacı ahşaba negatif sıcaklıkla muamele (kriyojenik işlem) edilmesinin ağaç malzeme mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde yeni bir modifikasyon yöntemi olarak kullanılabilirliğinin

belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda ağaç malzemenin kullanım yerlerindeki mühendislik tasarımı gerekleri doğrultusunda maruz kalması muhtemel yüklere karşı göstereceği dayanım performanslarının belirlenmesi için 6 farklı mekanik özellik belirlenmiştir. Bu mekanik özellikler; liflere dik eğilme direnci (ED), eğilmede elastikiyet modülü (EEM), liflere paralel kesme direnci (KD), liflere paralel basınç direnci (BD), liflere paralel çekme direnci (ÇD) ve Brinell sertlik (BS) değeridir. Bu mekanik özellikler malzemelerin yapısal özelliklerini tanımlamakla beraber malzemelerin ürüne dönüştürülmesi sonucunda kullanıldıkları ürünün kalite karakteristiği olarak ta kullanılabilir ve ürünlerin kullanım yerlerindeki servis verebilme süreleri ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısı ile ürünlerin tasarımı aşamasında malzemelerin yapısal özelliklerinin ya da malzemenin özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla uygulanan modifikasyon işlemlerinin sonucu ortaya çıkan değişimlerin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca ürünlerdeki kalite kayıplarının minimize edilmesi için, tasarım sonrası malzemelerin ürüne dönüşme aşamasında kullanılan tüm süreçlerde nihai ürün kalitesi üzerinde etkili olan faktörlerin tanımlanması ve bu faktörlerin optimize edilmesi gerekmektedir. Böylece nihai üründe arzu edilen kalite seviyesinin yakalanması mümkün olmaktadır.

Malzemelerin ürüne dönüşümü sürecinde kaliteyi etkileyen faktörlerin ve sistem parametrelerinin optimize edilmesi günümüzde endüstrilerde çözüm bekleyen en önemli problemlerden birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu problemin çözümü amacıyla geçtiğimiz yüzyılda çok sayıda yöntem geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanlarından birisi de Genichi Taguchi tarafından 1940'lı yıllarda geliştirilen ve kendi adıyla anılan Taguchi yöntemidir. Sonuç ürün kalitesinin iyileştirilmesi ve zaman kaybının engellenmesi için geliştirilen Taguchi yöntemi Japonya'nın endüstriyel olarak gelişimine çok büyük katkılar sağlamış ve ilerleyen süreçte hemen hemen tüm endüstri kollarında aktif olarak kullanılmıştır.

Taguchi yöntemi ürün kalitesinin etkileyen faktörleri süreç içerisinde kontrol edilebilen (değiştirilebilen) ve kontrol edilemeyen faktörler olmak üzere temelde ikiye ayırmaktadır. Bu yöntemin temel hedefi, kontrol edilebilen faktörleri optimize etmek suretiyle üründe ortaya çıkabilecek kalite kayıplarının minimize edilmesini sağlamaktır. Bu yöntemin sağladığı en önemli avantajlardan biri Taguchi tarafından yöntem kapsamında geliştirilen deney tasarım tekniğidir. Ortogonal deney tasarımı olarak bilinen bu yöntem ile ürün kalite iyileştirilmesi için yapılacak deneylerin sayısı tam faktöriyel deney tasarımları ile karşılaştırıldığında çok büyük oranda azaltılabilmektedir. Bu sayede deneyler için

harcanılan zaman ve maliyetlerde çok büyük kazanımlar elde edilebilmektedir. Ayrıca geliştirilen yöntem ile ürün kalitesi üzerinde etkili olan faktörler ve bu faktörlerin sonuç değer üzerindeki katkı (etki) düzeylerinin belirlenmesi sağlanmaktadır.

Bu nedenle çalışma kapsamında, ağaç malzeme mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu daha önceki çalışmalarda belirtilmiş olan ağaç malzeme rutubet miktarları ve uygulanan negatif sıcaklıkların bu özellikler üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla çalışma kapsamında Taguchi L₉ ortogonal deney tasarımı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve analizler yapılmıştır.

Çalışma kapsamında; Sarıçam (*Pinus Sylvestris L.*) kerestelerinden hazırlanan örnekler kriyojenik işlem (Kİ) den önce, hava kurusu (HK), lif doygunluğu (LD) ve suya doymuş (SD) rutubet miktarı olacak şekilde üç guruba ayrılmıştır. HK rutubet miktarı için 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve bağıl nemi 65 ± 5 olan iklimlendirme kabini içinde değişmez ağırlığa ulaşınca kadar bekletilmiştir. LD rutubet miktarı için 17 °C sıcaklıkta ve bağıl nemi %95 olan iklimlendirme kabini içinde değişmez ağırlığa ulaşınca kadar bekletilmiş ve SD rutubet miktarı için ise distile su ile doldurulmuş bir hazne içerisinde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiştir. Kriyojenik işlem (Kİ) uygulaması için numuneler -40 °C, -100 °C ve -140 °C sıcaklıklarda 2 saat süre ile normal atmosferik basınç altında bekletilmek suretiyle kriyojenik işlem uygulaması gerçekleştirilmiştir. Kİ sonrasında tüm örnekler 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve bağıl nemi 65 ± 5 olan iklimlendirme kabini içinde değişmez ağırlığa ulaşınca kadar bekletilmiş ve malzeme mekanik özelliklerini belirlemek üzere ilgili standartlara uyulmak suretiyle deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilerleyen bölümleri ise şöyledir. Birinci bölümde çalışma ile doğrudan ve dolaylı olarak ilişkili olan literatür derlenmiş ve değerlendirilmiştir. Bu bağlamda ağaç malzeme sıcaklık ve rutubet ilişkileri, ağaç malzemeye uygulanan modifikasyon yöntemleri ve kriyojenik işlem uygulamalarına yönelik literatür ele alınmak suretiyle bu çalışmanın gerekliliği ve gerekleri belirlenmiştir. İkinci bölümde ağaç malzeme rutubet ve sıcaklık ilişkileri ilgili literatürle desteklenerek kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ağaç malzeme modifikasyon yöntemleri açıklanarak ilgili literatür kapsamlı olarak verilmiştir. Dördüncü bölümde kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem uygulamaları açıklanmıştır. Beşinci bölümde deney tasarımı ve optimizasyon yöntemi çalışma ile ilişkili olarak açıklanmıştır. Çalışmanın altıncı bölümünde kullanılan materyal ve yöntem açıklanmıştır. Yedinci bölümde elde edilen bulgular açıklanmış ve ilgili literatürle karşılaştırılarak tartışılmıştır. Çalışmanın sekizinci bölümünde ise sonuç ve öneriler ortaya konulmuştur.

1.1. LİTERATÜR ÖZETİ

Ahşap malzeme higroskopik yapısı ve organik bir malzeme olması itibarı ile çevre ile etkileşim içindedir. Bulunduğu çevrede sıcaklık ve rutubete maruz kalması ile ahşap malzemenin yapısında değişimler meydana gelmekte bu da malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Belirli bir düzeye kadar sıcaklığın artmasına bağlı olarak yapısındaki suyu atması ile ahşap malzemenin mekanik özelliklerinde artma meydana gelmektedir [14].

Sıcaklık artışlarının süre artışlarına göre ağaç malzemeyi daha fazla etkilediği görülmektedir. 0 ile 150 °C arası sıcaklıklarda ahşap malzemeye muamele edilmesi malzemenin yapı elemanlarında önemli bir değişikliğe neden olmazken, özellikle 150 °C üzerindeki sıcaklıklar ağaç malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde önemli etkiye neden olmaktadır. Buna paralel olarak ağaç malzemenin mekanik özelliklerinde azalma meydana gelmektedir [15]. Sıcaklık miktarının özellikle 150 - 280 °C'ler arasındaki yüksek seviyelerde uygulanması ile ağaç malzemenin temel yapı malzemesi olan selüloz, hemiselüloz ve ligninin yıkımlanmasına bağlı olarak mekanik özelliklerinin düşmesine, boyutsal kararlılığının artmasına, mantar ve biyolojik zararlıların meydana getirdiği olumsuz etkilerin azalmasına ve su itici özelliğe sahip olmasına neden olmaktadır [16]. Yıldız'ın (2002) yaptığı çalışmada ısıtma işlemi uygulanan Doğu Kayını ve Doğu Ladini odunlarının fiziksel, mekanik, teknolojik ve kimyasal özellikleri incelenmiş elde edilen sonuçlarda, ısıtma işlem uygulamasının fiziksel özellikler üzerindeki etkisi özellikle boyutsal stabilizasyonu bakımından memnun edici bulunmuştur. Mekanik ve teknolojik özelliklerde, genellikle artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak bir düşüş kaydedilmiştir [17]. Buna ek olarak Sancar'ın (2016) yaptığı benzer bir çalışmada ise ısıtma işlem gören Sarıçam odununun bazı fiziksel, mekanik ve biyolojik direnç özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmış olup yapılan araştırma sonucunda mekanik ve teknolojik özelliklerde, genellikle artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak bir düşüş kaydedilmiştir [18].

Yukarıdan da görüldüğü üzere sıfır derece üstü sıcaklıkların (>0 °C) ahşap malzeme üzerine etkileri birçok araştırmaya konu olmuş ve bunun üzerine birçok bilgi ve bulgu edilmiştir. Fakat düşük sıcaklıkların (<0 °C) ahşap malzemelerin üzerine etkilerini değerlendiren sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Çok düşük sıcaklıklarla malzemeye muamele edilmesi kriyojenik işlem olarak adlandırılmaktadır. Özellikle ahşap ve ahşap kökenli malzemelere kriyojenik işlem sıcaklıkları ile muamele edilmesine yönelik ve bu

sıcaklıkların ahşap malzeme üzerindeki etkilerini açıklayan çok sınırlı sayıda çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Bunun sebebinin ise, kriyojenik işlemin çoğunlukla metaller üzerinde uygulanan ve bilinen bir teknik olması nedeniyle ahşap ile ilişkilendirilmemesi, önceki tekniklerin herhangi biri tarafından bahsedilmemesi, açıklanmaması ya da önerilmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [19]. Sıfır altı sıcaklıklar olarak ta bilinen Kİ çok düşük sıcaklıkların elde edilmesi ve bu sıcaklıklar altında malzemelerin yapısal özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen bir bilim dalıdır [20]. Soğutma işlemi kendi içinde işlemin uygulandığı sıcaklık aralığına göre ikiye ayrılır. -30°C'den -100°C'ye kadar olan sıcaklık aralığındaki işleme sığ kriyojenik işlem, -140 °C' ve daha düşük sıcaklık aralığı ise derin kriyojenik işlem olarak adlandırılmaktadır [21]–[23]. Kİ yaygın olarak metal endüstrisinde kullanılmakta olup genel anlamda malzemenin aşınma direnci, sertlik, yüzey pürüzlülüğü vb. özelliklerini artırmaktadır [24]. Çelikten üretilen ve endüstride yaygın kullanılan malzemelere Kİ sıcaklığı ile muamele edilmesi sonucu malzeme yüzeyinde çekme kalıntı geriliminin azaldığı, aşınma direncinin arttığı, yüzey pürüzlülüğünün iyileştirildiği bilinmektedir [25]–[27]. Bunun yanı sıra dökme demirden üretilen ve yüksek kuvvetlere maruz kalan malzemelere Kİ'nin uygulanması ile aşınma direncinin arttığı görülmektedir [28].

Kİ uygulamaları metal endüstrisinin dışında havacılık endüstrisinde de yaygın kullanıma sahip malzemelerin bazı mekanik özelliklerini geliştirme amacı ile kullanılmaktadır. Bu endüstride kullanılan malzemelerin hafif ve dayanım özelliklerinin yüksek olması beklenmektedir. Bu istenilen özelliklere uygun olarak karbon fiber takviyeli plastikler (CFRP) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Karbon fiber takviyeli plastiklere (CFRP) uygulanan Kİ ile dayanım özelliklerinin artırıldığı gözlenmiştir [29].

Kİ'nin ahşap malzeme üzerine etkileri ise, Ayrılmış ve arkadaşlarının (2010) yaptıkları çalışmada Kİ'nin ahşap malzeme mekanik özellikleri olan ED ve EEM değeri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda Kİ'nin etkisini belirlemek amacı ile, negatif ve pozitif sıcaklıkların kontrplak, orta yoğunluklu lif levha (MDF) ve yönlendirilmiş lifli levha (OSB) üzerine uygulanmasının ED ve EEM üzerine etkisi -30 °C ile 30 °C arasındaki sıcaklıklarda araştırılmıştır. Panellere uygulanan sıcaklıklar -30 °C'den 0 °C'ye arttıkça eğilme dayanımı (ED) ve eğilmede elastikiyet modülü (EEM) değerlerinin azaldığı gözlemlenmiş olup, bu değişimin 0 °C'den 30 °C'ye arttıkça benzer şekilde seyrettiği belirtilmiştir. Benzer sonuçların çalışmada kullanılan MDF ve OSB için de gözlemlendiği belirtilmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak malzemelerin mekanik özelliklerde

görülen azalmanın ED için yaklaşık %9,8 ile %12,5 iken EEM için yaklaşık %7,4 ile %9,6 aralığında gerçekleştiği belirlenmiştir [30].

Yapılan bir diğer çalışmada ise, (Jiang ve arkadaşları, 2014) meşe ağacından elde edilen ve standartlara uygun, deneylerde kullanılmak üzere hazırlanan ahşap malzemeye, farklı sıcaklık seviyelerinin ED ve EEM üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaç ile ED için -196 °C ila 220 °C sıcaklık aralığı, EEM için ise -196 °C ila 23 °C sıcaklık aralığı ile muamele edilmiştir. Her sıcaklık seviyesi için beşer (5) adet numune hazırlanmış olup, deney öncesi numuneler sıcaklığı ayarlanabilir bir odada her bir numune grubu 30 dakika bekletilmiştir. Yapılan deney sonuçlarının analizinde dört farklı veri elde edilmiştir. Bu veriler sırası ile sıcaklık 23 °C'den -196 °C'ye düşürüldüğünde ED'nin %283,91, EEM'nin ise %146,30 arttığı gözlenmiştir. ED ile düşük sıcaklıklar arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu, EEM ile sıcaklık arasındaki ilişkinin ise polinom modeliyle tanımlanabilir olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte son olarak, sıcaklık 23 °C'den 220 °C'ye yükseltildiğinde, ED'nin %67 azaldığı ve doğrusal olmayan bir ilişki olduğu gözlenmiştir [31].

Kİ'nin ahşap malzemenin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu ve bu etkinin farklı RM'ler de nasıl sonuçlar doğurduğunu belirlemek amacı ile, Gao ve arkadaşları (2015) yaptığı çalışmada, ahşap malzemeye sıcaklık ve RM'nin EEM üzerine etkilerini araştırmak için, kızılçam odunundan standartlara uygun 25,4 x25,4x407 mm³ ölçülerinde numunelerin statik ve dinamik EEM'si araştırılmıştır. Bu amaç ile sıcaklığın etkisini belirlemek için -40 °C ile 40 °C sıcaklık aralıkları ve rutubetin etkisini belirlemek için ise %0 ile %118 RM ahşap malzemeye muamele edilmiştir. Dinamik EEM'sini ölçmek için, ultrasonik ses dalgalarından ve ahşap malzemenin yoğunluğundan faydalanılmıştır. Statik EEM ise bir iklimlendirme odasında -40 °C ile 40 °C sıcaklık aralıklarında liflere dik eğilme direnci deneyleri ile ölçülmüş, yapılan deney sonuçlarının analizinde, dinamik ve statik EEM'nin sıcaklık ve RM'den etkilendiğini gösterdiği, donma noktasının üstündeki sıcaklıklarda ahşabın elastikiyet özelliğinin artan sıcaklığa paralel olarak azaldığı, donma noktası altındaki sıcaklıklarda ise ahşabın elastikiyet özelliğinin azalan sıcaklıkla hızlı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ahşabın sıcaklık ve RM değerinin elastikiyet özelliğinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve sıcaklığın etkisinin rutubet içeren malzemelerde kuru ahşap malzemelerden çok daha etkili olduğu tespit edilmiştir [32].

Yapılan benzer bir çalışmada ise, Zhao ve arkadaşları (2015a) yaptıkları çalışmada, düşük sıcaklıkların (0 < °C) ağaç malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmış. Bu kapsamda huş ağacının liflere dik eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü beş

farklı rutubet miktarına (tam kuru, tam yaş, taze, HK ve LD) sahip ahşap malzeme 0 °C ile -196 °C arasındaki sıcaklıklarda analiz edilmiş, düşük sıcaklıklarda ahşabın yapısal özelliklerini belirlemek için kriyojenik taramalı elektron mikroskobu (Cryo-SEM) kullanılmıştır. Elde edilen veriler irdelendiğinde, sıcaklık 0 °C'nin altına düştüğünde, numunelerin liflere dik eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü sıcaklık azaldıkça arttığı gözlemlenmiştir. Bulgular, aşırı düşük sıcaklıkların, çeşitli RM'ye sahip ahşap malzemenin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [33].

Zhao ve arkadaşlarının (2015b) yine yaptıkları benzer bir çalışmada ise, dört farklı RM'ye (tam kuru, tam yaş, taze, HK ve LD) sahip olan ahşap huş malzeme numunelerinin EEM'si düşük sıcaklık koşulları olan -196 °C (sıvı azot sıcaklığı) ile 20 °C (oda sıcaklığı) arasında etkileri incelenmiştir. Kristal yapısını analiz etmek için X-Işını Difraksiyonu (XRD) ve dinamik visko elastik özelliklerini değerlendirmek için Dinamik Mekanik Analiz (DMA) yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre, farklı RM'ye sahip ahşap malzemenin elastikiyet özelliğinin düşük sıcaklık ile muamele edilmesi sonrasında arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek RM'ye sahip örnekler ise daha düşük RM'ye sahip numunelere göre daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir [13].

Literatürden de görüldüğü üzere ahşap malzemenin negatif sıcaklıklara maruz kalması sonucu mekanik özelliklerinde bazı iyileşmelerin ortaya çıktığı görülmektedir. Bu doğrultuda Kİ'nin ahşap malzemenin mekanik özellikleri üzerine olumlu etkileri olduğuna yönelik literatürde sınırlı sayıda çalışma görülmüştür. Bu çalışmalardan en dikkat çekici ve kayda değer iyileştirmeler sağlandığını ifade eden çalışma Amerika Birleşik Devletleri Patent Enstitüsüne yapılan bir patent başvurusudur. Bu başvuruda ahşap beysbol sopalarına uygulanan Kİ'nin sopaların mekanik özelliklerini artırdığını ve beysbol sopalarının oyun esnasındaki darbeler sonucu kırılması durumunda ortaya çıkan sivri, keskin uçlu parçaların azalmasının sağlandığı, bu sayede gerek oyuncu gerekse seyircilerin güvenliğini artırdığı belirtilmiştir. Bu çalışmada ahşap beysbol sopasının -190 °C'de 24 saat boyunca Kİ ile muamele edildikten sonra ED'nin %26 arttığını ortaya koymaktadır [19]. Yapılan bu çalışma bizim araştırmamıza ilham kaynağı olmuştur.

Sonuç olarak ahşap malzemenin sıfır altı ($0 < \text{°C}$) sıcaklıklar ile muamele edilmesi malzemenin mekanik özellikleri üzerinde olumlu sonuçları olacağı ön görülmüştür. Bu etkinin ahşap malzeme üzerine etkilerinin ne olacağı ile ilgili ülkemiz yerli ağaçları ile ilgili yapılan çalışmalarda derin Kİ sıcaklıkları ile ilgili sistematik bir araştırmanın olmaması nedeniyle görülen bu eksikliğin giderilmesi amacıyla bu çalışma yapılmıştır.

2. AĞAÇ MALZEME RUTUBET VE SICAKLIK İLİŞKİSİ

2.1. AĞAÇ MALZEME RUTUBET İLİŞKİSİ

Ağaç malzemenin kuruluk derecesi malzemenin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir. Yeni kesilmiş bir ağaçta %45-%200 oranında su bulunmaktadır. Bu su miktarı hücre çeperleri içerisinde ve hücre boşluklarında bulunmaktadır. Hücre boşluklarında var olan su akıcıdır ve buna serbest su, hücre çeperleri içerisinde miseler ve fibriller arasındaki suya ise higroskopik su denmektedir. Ağaç malzemenin bazı rutubet halleri aşağıda sıralanmıştır [14], [34].

2.1.1. Tam Kuru Rutubet Hali

Ahşap malzemenin kurutma dolabında 103 ± 2 °C sıcaklıkta içindeki tüm suyu atması ve değişmez ağırlığa gelmesi ile boşluklarının tamamı hava kitlesi dolmasına tam kuru rutubet hali denmektedir [14], [34].

2.1.2. Tam Yaş Rutubet Hali

Ağaç malzemenin uzunca bir süre su içerisinde bekletildiğinde, bütün boşlukları su ile dolar, bu seviyesi en ağır kütle halidir [34]. Bu duruma tam yaş hal denir. Bu durum ahşap malzeme için ekstrem bir durumdur [35].

2.1.3. Taze Rutubet Hali

Ağacın sağlam ve dikili haldeyken veya kesilmesinden hemen sonra bünyesinde bulunan rutubet miktarıdır [1] ve yeni kesilmiş ağaçta RM ağaç türü ve türün yapısal özelliklerine bağlı olarak yaklaşık %45 ile %200 oranında değişebilmektedir [14].

2.1.4. Lif Doygunluğu Rutubet Hali

Ahşap malzemenin içerisinde serbest suyun bulunmadığı bağlı suyun mümkün olan en üst seviyede olduğu duruma denir [14]. Başka bir ifadeyle hücre çeperinin tamamen su ile dolduğu ama hücre boşluklarında suyun olmadığı rutubet halidir. Malzeme bu haliyle hacimsel olarak en üst seviyededir, bu seviyeden sonra ahşap malzeme su alma işlemi devam etse dahi malzemenin boyutlarında önemli bir değişim meydana gelmez [36].

2.1.5. Hava Kurusu Rutubet Hali

Ağaç malzeme ile hava arasında meydana gelen denge rutubetidir [1]. Ağaç malzemenin açıkta doğal olarak kurutulması ile oluşan rutubet miktarına HK rutubet miktarı denilmektedir. HK düzeyi çevresel koşullara bağlı olarak %10 ile %20 arası RM olarak kabul edilmektedir. Bilimsel çalışmalarda karşılaştırmaların kolaylaştırılması amacıyla HK rutubet miktarı %12 olarak alınmaktadır [35].

Ağaç malzemenin mekanik özellikleri ile sahip olduğu RM arasında doğrudan ilişki bulunmaktadır. Ağaç malzemenin sahip olduğu RM ile ilişkili olarak %12 RM'e göre mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişim Çizelge 2.1'de görülmektedir [5].

Çizelge 2.1. Nem içeriğinin, yaklaşık 20 ° C'de ahşabın mekanik özellikleri üzerindeki ortalama etkileri.

Mekanik Özellik	Mekanik özelliklerde %12 RM göre nispi değişim	
	6 %RM	20 %RM
	%	%
Liflere paralel elastikiyet modülü (EEM //)	+9	-13
Liflere dik elastikiyet modülü (EEM ⊥)	+20	-23
Kesme modülü	+20	-20
Eğilme Direnci (ED ⊥)	+30	-25
Liflere paralel çekme direnci (ÇD//)	+8	-15
Liflere paralel basma direnci (BD//)	+35	-35
Liflere paralel kesme direnci (KD//)	+18	-18
Liflere dik çekme direnci (ÇD⊥)	+12	-20
Orantılı limitte liflere dik basınç dayanımı (BD⊥)	+30	-30

2.2. AĞAÇ MALZEME SICAKLIK İLİŞKİSİ

Ağaç malzeme higroskopik yapısı nedeniyle bulunduğu ortamın rutubet miktarına bağlı olarak nem alışverişinde bulunmak suretiyle rutubet dengesi sağlamaktadır. Ağaç malzemenin mekanik özellikleri üzerinde RM ve sıcaklık, önemli etkiye sahiptir. Ağaç malzeme mekanik özellikleri üzerinde sıcaklığın etkisi ahşabın RM'e bağlı olarak değişmektedir. Ağaç malzemenin sahip olduğu farklı rutubet miktarına göre -50 °C ile

50 °C arındaki sıcaklık değişiminin 20 °C'deki örneklere göre mekanik özelliklerde ortaya çıkardığı değişim Çizelge 2.2'de görölmektedir [5].

Çizelge 2.2. Farklı rutubet miktarına sahip ağaç malzemede sıcaklığın mekanik özellikler üzerindeki ortalama etkileri.

Mekanik özellikler	Mekanik özelliklerde 20 °C'ye göre nispi değişim		
	RM	-50 °C	50 °C
	%	%	%
Liflere paralel elastikiyet modülü (EEM //)	0	+11	-6
	12	+17	-7
	>FSP	+50	-
Liflere dik elastikiyet modülü (EEM ⊥)	6	-	-20
	12	-	-35
	≥20	-	-38
Kesme modülü	>FSP	-	-25
Eğilme Direnci (ED ⊥)	≤4	+18	-10
	11-15	+35	-20
	18-20	+60	-25
	>FSP	+110	-25
Liflere paralel çekme direnci (ÇD//)	0-12	-	-4
Liflere paralel basma direnci (BD//)	0	+20	-10
	12-45	+50	-25
Liflere paralel kesme direnci (KD//)	>FSP	-	-25
Liflere dik çekme direnci (ÇD⊥)	4-6	-	-10
	11-16	-	-20
	≥18	-	-30
Orantılı limitte liflere dik basınç dayanımı (BD⊥)	0-6	-	-20
	≥ 10	-	-35

Sıcaklık ve süre arttıkça ahşap malzemenin hücre çeperindeki hidroksil gruplarında meydana gelen azalmaya paralel olarak, denge rutubet miktarının düşmesine, daha az higroskopik ve boyutsal olarak daha stabil yapıya dönüşerek farklı oranlarda iyileşme sağlanabilmektedir. Bu değişiklikler sonucunda malzemenin kullanım yerinde göstermesi

gereken dayanım özelliklerinde farklılıklar meydana gelmektedir [37].

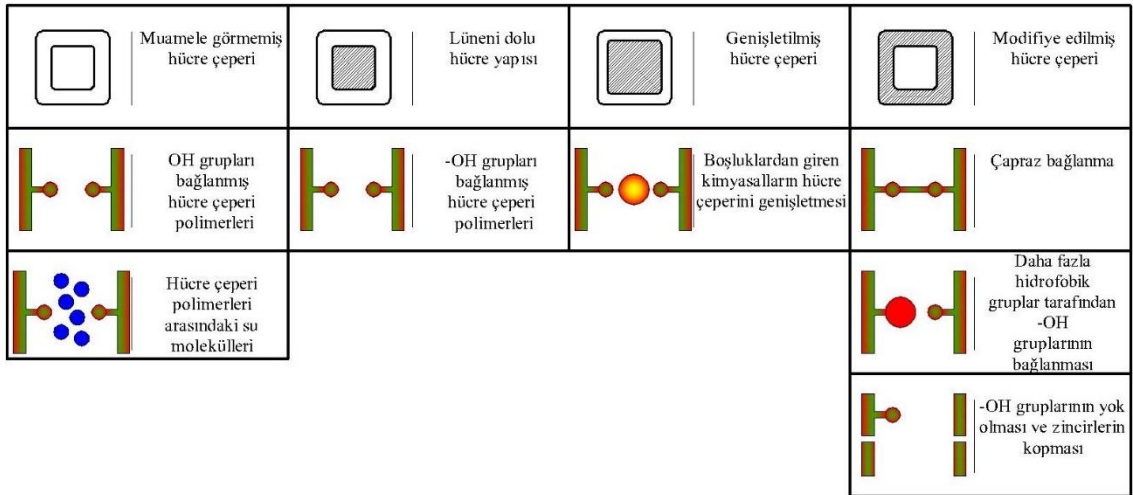
Sıcaklığın etkisiyle ağaç malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Oluşabilecek bu değişikliklerden, ağaç malzemenin maruz kaldığı sıcaklık kadar ortamın basıncı, uygulanan süre, malzemenin içerdiği su miktarı ve fiziksel durumu gibi faktörler de etkilidir. Bu etki ahşabın sıcaklığa maruz bırakılması ile birlikte hücre çeperlerinin boyutlarında daralma meydana getirmektedir. Ahşap malzemenin temel bileşenleri genel olarak 100-120 °C sıcaklıklara kadar önemli değişiklik göstermektedir. Lignin sıcaklığa karşı en dayanıklı temel bileşen olma özelliğini gösterirken, polyozlar sıcaklıktan en fazla ve öncelikli etkilenen odun bileşenleri olarak bilinmektedir [38].

Özellikle daha önce belirtildiği gibi 150 °C ve üstü sıcaklıkların ahşap malzemeye tatbik edilmesi ile malzemenin yapısında bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin miktarında ve yapılarında önemli değişimler meydana getirmektedir. Ahşabın temel yapı malzemesi olan hemiselülözün ilk olarak bozunmaya uğraması, oluşan yeni yapı üzerinde en belirleyici faktörlerden biri olmaktadır. Bu değişimler sonunda ağaç malzemenin denge rutubet miktarı ve diğer birçok özelliği de değişmektedir. Ahşap malzemedeki sıcaklık artışına paralel olarak renginde koyulaşma meydana gelmekte ve denge rutubet miktarı da düşmektedir. Ağaç malzemenin yapısında meydana gelen köklü değişiklikler ile birlikte su alma miktarında ve suda şişme değerleri de belirli oranlarda azalmaktadır [15]. Ağaç malzemenin fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çok sayıda modifikasyon yöntemi kullanılmaktadır. Bu modifikasyon yöntemleri bir sonraki bölümde ele alınmıştır.

3. AĞAÇ MALZEME MODİFİKASYON YÖNTEMLERİ

Ağaç malzemeye mümkün olan en uzun kullanım ömrünün kazandırılması amacı ile malzemeye zarar veren ve kullanım ömrünü azaltan biyotik ve abiyotik etkenlere karşı uygun kimyasal maddeler ve yöntemlerin ahşaba muamele edilmesi (empranye) çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Fakat bu yöntemlerin uygulanmasının çevreye olumsuz etkilerinin olması, hedeflenmeyen canlıları etkilemesi, zehirli bileşenler içermesi, boyutsal stabiliteyi sağlayamaması veya sağlayan yöntemlerin pahalı olması gibi birçok dezavantaja sahiptir. Son 20 yılda çevre bilincinin artmasına paralel olarak çevreye zararlı emprenye maddelerinin kullanımında çeşitli kısıtlamalar ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda odun koruma maddeleri, Amerika’da Çevre Koruma Ajansı (EPA), Kanada’da Zararlılarla Mücadele Ajansı (PMRA) ve Avrupa Birliğinde ise 2012 yılında kabul edilmiş ve üye ülkelerde 1 Eylül 2013 tarihinden itibaren geçerli olan Yeni Biyosit Ürünleri Düzenleme kanunlarıyla (BPR 528/2012) denetim altında tutulmaktadır [10]. Bu durum emprenye yöntemi ile ortaya çıkan olumsuz etkilerin giderilmesi amacı ile ahşap malzemenin boyutsal stabilitesini arttıran ve biyolojik bozunmaya karşı koruyan yeni çevre dostu modifikasyon yöntemlerin gelişimine yol açmıştır [16].

Ahşap malzemede meydana gelebilecek olan odun modifikasyon türleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir [39].



Şekil 3.1. Odun modifikasyon türleri [39].

Daha öncede belirtildiği üzere, odun modifikasyon yöntemleri araştırmacılar tarafından farklı farklı olarak sınıflandırılrsa da, genel olarak kabul gören odun modifikasyon yöntemlerini şu şekilde sınıflandırabiliriz [10].

- Kimyasal Modifikasyon,
- Yüzey Modifikasyonu,
- Emprenye Modifikasyonu,
- Termal Modifikasyon

3.1. KİMYASAL MODİFİKASYON

Kimyasal modifikasyon, hücre çeperini oluşturan yapı bileşenleri ile kimyasal madde arasında katalizörlü veya katalizörsüz bir kovalent bağın oluştuğu kimyasal reaksiyonu ifade etmektedir. Bu işlem ahşap malzemede, boyutsal kararlılık, düşük denge rutubeti, mantar ve böceklerle karşı biyolojik dayanıklılık, akustik özelliklerinde iyileşme ve dış hava koşullarına karşı daha dirençli olması gibi olumlu etkilerinin yanı sıra, ahşapta çekme dayanımı ve elastikiyet özelliklerinde azalmaya da neden olabilmektedir [12], [40].

Kimyasal modifikasyon yöntemlerini genel olarak şu şekilde sıralayabiliriz [10].

- Asetillendirme
- Furfurilasyon
- N- methol (DMDHEU)
- Reaktif yağ uygulamaları

3.2. YÜZEY MODİFİKASYONU

Yüzey modifikasyon yönteminde temel amaç ahşap yüzeyin birkaç milimetre derinliğinin yoğunlaştırılması ile ahşap malzemede hacim kaybının en aza indirilerek yüzey kalitesinin artırılması sağlanır. Yüzey modifikasyon yöntemde ahşap yüzeyin ıslatılması ve sonrasında sıkıştırma işlemi yapılarak yüzeyin yoğunlaştırılması prensibine dayanır [11].

3.2.1. Enzimatik Modifikasyon

Enzimatik modifikasyon yönteminde ise, lakkaz enzimi ile fenolik bileşiklerin oksidasyonu sonucu lignoselülozik liflerin bağ yapması sağlanır. Enzim yöntemi kullanılarak levha ve panellerin sentetik yapıştırılması daha ekonomik olmasına ve çevresel avantajlara sahiptir. Lakkaz ile muamele edilen liflerden üretilen lif levhaların mekanik özelliklerinin arttığı belirlenmiştir [40].

3.3. EMPRENYE MODİFİKASYONU

Emprenye modifikasyonu, kimyasal birleşikler veya kimyasal maddeler ile ahşap malzeme hücre çeperini emprenye etme işlemidir. Diğer bir deyim ile hücre çeperi içindeki materyalin uygun form haline gelmesi için reaksiyona girmesidir. Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için, emprenye maddesinin ahşabın hücresine tamamen nüfuz ettirilmesi gerekmektedir. Emprenye etme işleminin tespiti iki temel mekanizma ile gerçekleştirilebilir [12].

- Arka arkaya yapılan polimerizasyon işlemi ile hücre çeperini monomer (veya oligomer) olarak emprenye etme.
- Çözünmeyen materyal karıştırılarak arka arkaya yapılan işlemler ile hücre çeperi içine çözünebilen materyalin difüzyonu.

3.4. TERMAL MODİFİKASYON

Termal modifikasyonda amaç kimyasal reaksiyonların hızlandığı sıcaklık aralığında ağaç malzemenin ısı ile muamele edilmesidir. Böylece hücre çeperindeki polimer bileşiklerin kimyasal yapısında kalıcı olarak değişim sağlanır [9]. Bu metot ile ahşaba herhangi bir kimyasal madde verilmeksizin odun özelliklerinin iyileşmesi istenmektedir.

Termal modifikasyon 180 °C ile 260 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşir. Eğer sıcaklık 140 °C'nin altında bir sıcaklıkta tutulursa ahşap malzemede sadece özellikleri değişir, eğer bu sıcaklığın üstüne çıkılırsa ahşap malzemede arzu edilmeyen yıkımlar gerçekleşir. 300 °C sıcaklığın üzerinde yapılan ısı işlem çalışmaları sonucu ahşaptaki birçok önemli maddenin yıkımlandığı belirlenmiştir [12].

Termal modifikasyon uygulaması, ahşabın moleküler yapısını değiştirdiğinden dolayı ahşap malzemenin performansını arttırmaktadır. Bu işlem ahşap malzemede daralma ve

genişlemedeki azalmaya bağlı olarak artan boyutsal kararlılık, mantar ve böceklerle karşı biyolojik dayanıklılık, düşük denge rutubeti, artan termal yalıtkanlık kabiliyeti, boya adezyonu, dış hava koşullarına karşı dirençli olması, dekoratif renk çeşitliliği ve kullanım süresini de uzatmaktadır. Isıl işlem uygulaması aynı zamanda daha düşük kalitedeki ağaç türlerini daha kaliteli ağaç türlerine karşı rekabetini arttırmakta ve sürdürülebilir orman kaynaklarını desteklemektedir. Ayrıca lifli kompozit malzemeler ve kaplamalara termal modifikasyonun tatbik edilmesi ile, dayanım ve kullanım ömrünün artmasına, daha stabil yapıya dönüşmesine, ürün emniyetinde iyileşmesine, daha yüksek fiyat değerine sahip olma ve güvenilirlik gibi özellikler kazandırmaktadır. Isıl işlem, ahşap malzemede meydana gelen tüm bu değişmelere ek olarak insan ve çevreye zararlı kimyasallar maddeler ilave edilmeden elde edildiğinden emprenyeye iyi bir alternatif olarak düşünölmektedir [41].

Günümüzde termal modifikasyon yöntemleri Avrupa'nın birçok ölkesinde değişik isimler ile adlandırılmaktadır. Örneğın Finlandiya ahşap malzemenin ısıtılması için buhar kullanmış ve buna "ThermoWood" yöntemi adını vermiştir. Hollanda sıcak hava ve buharın birlikte kullanarak "Plato" yöntemi, Almanya sıcak yağ kullanarak "OHT" yöntemi ve Fransa inert gaz kullanarak "Rectification ve Perdur" yöntemi olarak adlandırmışlardır [42].

Termal modifikasyon yöntemlerini genel olarak şu şekilde sıralayabiliriz.

- ThermoWood
- PlatoWood
- Retifikasyon ve Perdur
- Sıcak Yağ Yöntemi (OHT)

4. KRİYOJENİK İŞLEM

4.1. KRİYOJENİK SOĞUTMA

4.1.1. Kriyojenik Soğutma Nedir?

Kriyojenik çok düşük sıcaklıkların elde edilmesi ve bu sıcaklıklar altında malzemelerin yapısal özelliklerini inceleyen bilim dalıdır. İsim olarak Yunan kökenli kryos (buz) ve genic (üretmek) kelimelerinin birleşmesinden oluşmuştur [20].

4.1.2. Kriyojenik Biliminin Tarihsel Gelişimi

Sıcaklığın malzemeler üzerindeki etkisi ve farklı etkileşim özelliklerinin kullanılması insanlık medeniyetinin ilerlemesine eşsiz katkılar sağlamıştır. İnsanoğlu yüksek sıcaklıkları tarih öncesi zamanlardan beri ısınma, aydınlatma ve yemek pişirme için kullanmıştır [43].

Medeniyetin ilerlemesiyle birlikte daha yüksek sıcaklıklar elde edilebilmiş, bu gelişmeyle de demir gibi metaller dövülmeye başlanarak mekanik ve fiziksel özellikleri daha üstün aletler üretilmiş, daha dayanıklı çanaklar yapılmıştır. Hatta Çinliler yüksek sıcaklıklarda kili pişirmeyi (sinterleme) öğrenmişlerdir [43].

Sanayi devrimi ile birlikte ortaya çıkan buhar makineleri sayesinde daha verimli üretim ve taşıma için muazzam güçler elde edilebilmiştir. Özellikle son yüzyılda yüksek sıcaklıklarda kimyasal reaksiyonların yapılabilmesi birçok yeni ve geliştirilmiş malzemelerin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Yüksek sıcaklıkların kolay elde edilebilir olması sebebi ile yüksek sıcaklık uygulamaları uygarlık tarihinin başlangıcından beri süregelmektedir. Oysa düşük sıcaklık değerlerini üretmenin zorluğu insanoğlunun düşük sıcaklık uygulamalarında oldukça geriden gelmesine neden olmuştur [43].

Düşük sıcaklık uygulamaları, yüzyıllardır sadece doğal olarak oluşan buzun kullanımı ile mümkün olmuştur. Mısırlıların M.Ö. 2500'lü yıllarda yanık ve burkulma tedavisinde buz kullandığı bilinmektedir. Çinliler ise M.Ö. 2000'li yıllarda yemek yapımında buz kullandığı tarihi kaynaklarda yer almaktadır [44].

Uygarlığın çok ileriki safhaları olan 18. yüzyılın sonlarında insanoğlu sıcak havalarda serinlemek ve gıda saklamak amacı ile buz kullanmaktaydılar. Buz ilk kez laboratuvar koşullarında yapay olarak 1755 yılında üretilse de, sanayi devrimi ile birlikte buhar motoru ve basit kompresörler icat edilinceye kadar halen yüksek kesimlerdeki dağ ve göllerden temin edilip, taşınarak kullanılmaya devam edilmiştir [43].

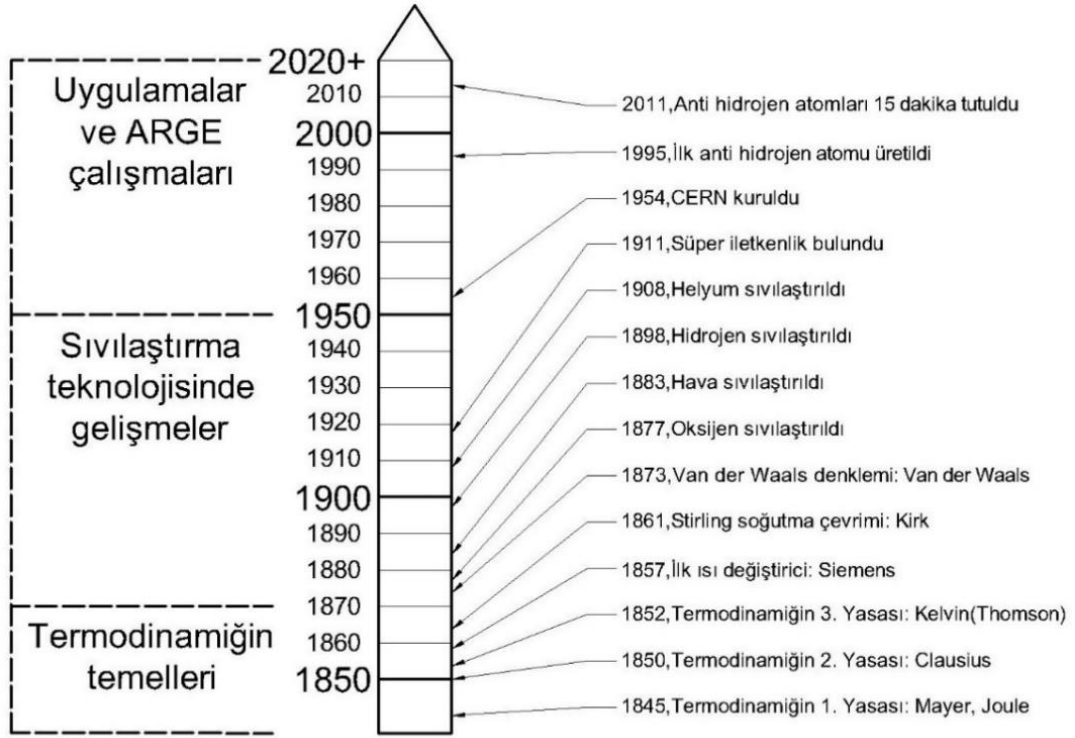
1900'lü yılların ilerleyen dönemlerinde buhar makinaların endüstriyel olarak kullanılmaya başlanması ile buz, fabrikalarda üretilmeye başlandı. İlk endüstriyel buzdolabının kullanılmaya başlaması ile buz üretimi evlerde de mümkün oldu [45]. Şekil 4.1'de 1900'lü yılların başında evlerde kullanılan buzdolabı tipi görülmektedir.



Şekil 4.1. 1900'lü yılların başında evlerde kullanılan buzdolabı [46].

Alman bilim insanı, Carl Von Linde 19. yy sonlarında havanın sıvılaştırılmasını sağlayıp, kriyojenik biliminin ilerlemesine çok önemli katkılarda bulunmuştur. Havanın sıvılaştırılması ile 100 Kelvin (K) altındaki çalışmaların yapılabilirliği mümkün olmuştur. Yaptığı çalışmalar sayesinde diğer gazlarında sıvılaştırılması için bilimsel çalışmalara ışık tutan Alman bilim insanı, bugün Hompson-Linde döngüsü olarak bilinen gazların ayırma ve sıvılaştırma süreci için 1903 yılında patent almıştır [47].

Havanın sıvılaştırılmasıyla birlikte kriyojenik bilimi artık yepyeni bir safhaya geçti ve sıvılaştırma teknolojileri her geçen gün geliştirilmeye başladı. Bu gelişme ile kriyojenik bilimi uygulamaları endüstri, tıp, mühendislik, ulaşım, tarım ve askeri alan gibi sektörlerde geliştirilmeye başlandı. Kriyojenik işlemin tarihsel süreçteki gelişimi Şekil 4.2'de görülmektedir.



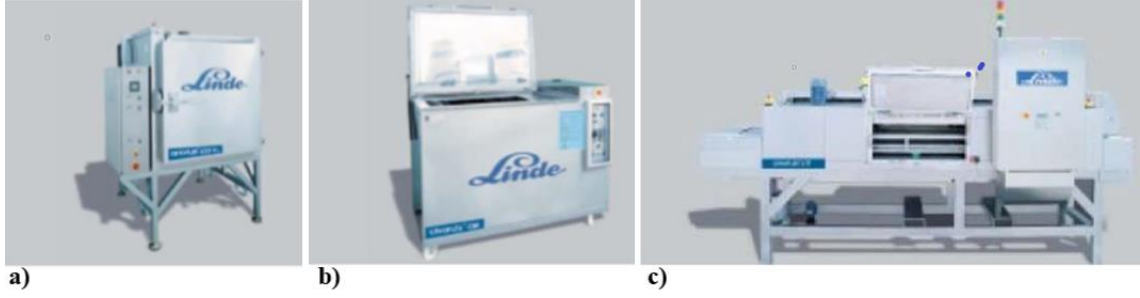
Şekil 4.2. Kriyojenik işlemin tarihsel gelişimi [43].

4.2. KRİYOJENİK İŞLEMİN UYGULANMASI

Önceleri Kİ uygulamaları, iş parçalarının direkt olarak sıvı nitrojen içerisine batırılması ve bu işlem sonucunda meydana gelen ani ısı değişimine bağlı olarak iş parçalarda termal şoklara neden olmaktadır [48]. Bilgisayar kontrollü sistemlerin kullanılması ile birlikte sıcaklığın, kontrollü bir şekilde indirilmesine ve bunana bağlı olarak Kİ uygulamalarının daha sorunsuz hale gelmesi sağlanmıştır [49].



Şekil 4.3. Doğrudan soğutma prensibi ile çalışan sıfır altı işlem ekipmanı şematik gösterimi [49].



Şekil 4.4. Farklı yapıda sıfır altı işlem ekipmanları a) Önden yerleştirmeli b) Üstten yerleştirmeli c) Sıfır altı tünel soğutucu [50].

4.3. KRİYOJENİK İŞLEMİN KULLANIM ALANLARI

Kİ parçaların performansını artırmak amacı ile imalat sanayi, döküm, enjeksiyon kalıplama, demir dövme, kaynak, otomotiv, uzay, elektronik, çelik, kereste, madencilik, tarım, spor ekipmanları, müzik aletleri ve ateşli silahlar gibi birçok endüstriyel sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [50].

4.4. KRİYOJENİK İŞLEM UYGULAMALARINDA KULLANILAN SOĞUTMA METODLARI

Parçaları istenen Kİ sıcaklığına indirmek için farklı yöntemler bulunmakla birlikte bu yöntemlerin hepsinde aynı termodinamik yöntemler kullanılmaktadır. Kİ uygulama işlemi doğrudan ve dolaylı soğutma olarak iki ana grupta incelenmektedir [24], [50], [51].

4.4.1. Doğrudan Soğutma

Bu yöntemde, sprey püskürtme sistemi kullanarak azotun atomize edilmesi ile çok soğuk gaza dönüşerek buharlaşması esnasında iş parçasını soğutması esasına dayanır. Noktasal martenzit oluşumunu önlemek için sıvı azotun direkt olarak parçayla teması önlenerek sadece soğuk azot gazının parçayı soğutması sağlanmaktadır. Soğuma hızı ise akış kontrol sistemi sayesinde kontrolü bir şekilde uygulanması sağlanır [24], [50], [51].

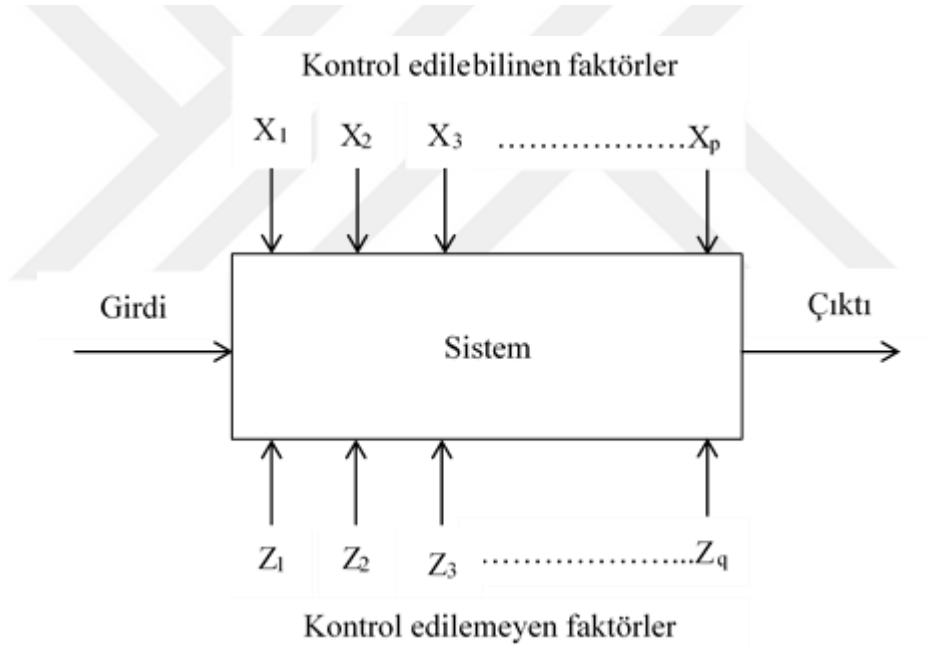
4.4.2. Dolaylı Soğutma

Alkol dolu bir tank haznesinin azot gazı kullanılarak dolaylı yoldan alkolün soğutulması ve soğutulacak elemanların alkole daldırılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntem ile maksimum ulaşılabilecek en düşük sıcaklık $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir [24], [50], [51].

5. DENEY TASARIMI VE OPTİMİZASYON

Deney, bilimsel bir hakikati, yasayı ya da hipotezi açıklamak, tespit etmek, doğrulamak, ispat etmek amacı ile belirli yöntem ve kurallara uygun olarak yapılan işlemler dizisidir. Deney Tasarımı ise, bir sisteme giren değişkenler üzerinde hedeflenen değişikliklerin uygulanması, dönüt olarak farklılıklara ulaşılması ve bu farklılıkların yorumlanması olarak ifade edilebilir [52].

Deney Tasarımında süreç eniyilemesinde, parametrelerin belirlenmesinde tanımlanmasında ve parametrelerin azalmasında kullanılan bir yöntemdir. Bir düzeneğin genel gösterimi Şekil 5.1’de gösterilmektedir [53].



Şekil 5.1. Bir sistem ya da sürecin genel modeli [53].

5.1. DENEY TASARIMI ADIMLARI

1. Problemin tespiti,
2. Deneyin amacının belirlenmesi,
3. En iyi performansın belirlenmesi,
4. Performans karakteristiklerini etkileyeceğine inanılan faktörlerin belirlenmesi,

5. Faktörlerin kontrol ve gürültü faktörleri olarak ayrılması,
6. Deney tasarımının belirlenmesi,
7. Elde edilen verilerin toplanması,
8. Verilerin irdelenmesi,
9. Ortaya çıkan sonuçların yorumlanması,
10. Doğrulama deneyleri yapılarak teyit edilmesi,

5.2. TAGUCHİ YÖNTEMİ

Yapılacak deneylerin tasarlanması esnasında, deney sayısının minimize edilmesi ve buna bağlı olarak oluşacak maliyet ve harcanacak zamandan tasarruf edilmesini ve sonuç olarak yapılacak deneylerde en uygun sonuçların elde etmesini sağlayan Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir [54].

5.3. TAGUCHİ YÖNTEMİNİN GELİŞİMİ

Deney tasarımı; ilk olarak İngiliz İstatistikçi Sir Ronald Fisher tarafından tarım alanında araştırmalar yaparken bulunan ve sonrasında geliştirilmeye devam eden bir yöntemdir. Geliştirdiği deney tasarım yöntemi, Amerika’da tarım üretiminde verimin artırılması için uygulamalar başlatılmış ve böylece Amerika bu sektörde lider konuma gelmesine büyük katkı sağlamıştır. Yöntemin öncelikli olarak tarım sektöründe, iklim koşullarının, sulama yüzeylerinin; gübre ve dozları ile çeşitli ürünlere olan etkilerini belirleyebilmek için uygulanmıştır. Fisher’ın deney tasarımıyla gerçekleştirdiği varyasyon azaltılması günümüzün modern kalite kontrol anlayışını doğurmuştur. Ayrıca halen kullanılan “varyans analizi” (ANOVA) yöntemi de Fisher’ın çalışmaları sonucunda gelişmiştir [55].

Deney Tasarımı (DT), sonraki yıllarda kimya ve ilaç endüstrisinde de kullanılmış olsa da, imalat sektöründeki çalışmalar 1970’li yıllardan sonra yeni yeni kullanılmaya başlanılmıştır. Deneysel tasarımın temel prensipleri batıda pek fazla bilinmez iken Japonya’da oldukça yoğun bir kullanıma sahipti [56]. Amerika’da 1980 yıllarında imalat sektörü, Japonya’daki kalite çalışmalarını incelemesi neticesinde, çalışmalarını geliştirmeye başlamıştır [57]. Aynı tarihte ‘Taguchi Metodu’ terimi Amerika’da kullanılmaya başlandı.

Japonya’da, İkinci Dünya Savaşı’nın bitimine doğru, gelişmeler hızlanmaya başlamıştır. Bu süreçteki en önemli girişimlerden biri Japon telefon sisteminin geliştirilmesiydi. İstenilen hedef, Amerika’da Bell Laboratuvarlarında kullanılan telefon sisteminin Japonya’da kurulmasıydı. Bu çalışmaların bitmesi için gerekli süre 20 sene olarak tahmin ediliyordu. Genichi Taguchi, bu süreyi azaltmak amacıyla, tüm araştırma personeli için metotların tekrar gözden geçirilmesini, irdelenmesini ve faktöriyel tasarımların kullanılması fikrini öne sürdü. Bu çalışma sonucunda süre 4 yıla kadar düşürüldü ve Taguchi etkili bir metot geliştirmiş oldu [55].

Taguchi’nin geliştirdiği metot imalat sektörünün de dikkatini çekmiş ve Japonya’da yeni ve başarılı uygulamaları ile deneysel tasarım anlayışının oturmasında önemli bir etkiye sahip olmuş ve bu sayede kalite kontrol sistemleri geliştirilerek tüm dünyada araştırmalarda adı geçen birisi olarak tarihe geçmiştir.

5.3.1. Taguchi Yöntemi Kayıp Fonksiyonu

Maliyet değerlendirme hesaplamalarında kullanılan bir fonksiyon türüdür. Bu sistemde; hedeflenen değerden sapma maliyeti hesaplanmaktadır. Normalde yapılan kalite kontrolde ürünler, hedef değerden sapmalarına bakılmaksızın, belirlenen aralıklar arasında olmalarına göre değerlendirmeye alınırlar. Ölçülen bu değerler, sınır içinde değilse, parça yeniden işlemeye veya atık malzeme bölümüne sevk edilir. Sınır dâhilinde, kabul edilir. Şirkete göre ise, kayıp veya tamdır, ya da sıfırdır. Bu sistemin gelişimi şematik olarak Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Şekilde, yatay eksen hedeflenen sapmanın miktarını, dikey eksen finansal kaybı ifade ediyor. Kayıp ise; malzemenin fabrika çıkışından sonra oluşan tüm kayıplar toplamıdır. Burada; ürün iadesi, garanti talepleri, müşterinin tamir giderleri gibi maliyetleri içerir. Hedeflenen değerden uzaklaştıkça sapmanın karesi oranında kayıp artmaktadır [55].

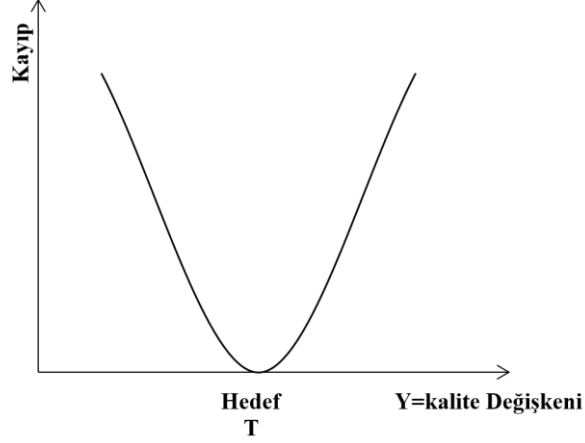
Kayıp fonksiyon denklemi;

$$\text{Kayıp: } k(Y-T)^2$$

T : Hedef değer,

Y : değişkenin ölçüm değeri,

K : sapmayı birbirine çeviren katsayı [55].



Şekil 5.2. Taguchi kayıp fonksiyonu [55].

Amaç sadece belirlenen sınırları karşılamak değil, amaçlanan hedefe oluşan sapmaları minimum düzeye indirmektir.

5.4. VARYASYON ÖLÇÜMÜ

Varyasyonu ölçmek için, R ve S örneklem olmak üzere;

- R, aralık
- S, standart sapması

Aralık R, belli bir örneklem için, Eşitlik 5.1’de gösterildiği gibidir.

$$R = En \text{ büyük gözlem eğeri} - En \text{ küçük gözlem eğeri} \quad (5.1)$$

R, maksimum ve minimum değerlerden fazla etkilendiğinden, Varyasyon ölçüsü olarak R’nin yerine hesaplanması daha zor olabileceğinden, S, değeri standart sapma kullanılabilir [55].

Standart sapma S, örneklem varyansı S^2 ’nin pozitif kareköküdür. Varyansın S^2 ’nin formülü Eşitlik 5.2’de gösterildiği gibidir.

$$S^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum (Y - \bar{Y})^2 \quad (5.2)$$

Y : Gözlenen değer

\bar{Y} : Gözlenen değerlerin ortalaması

n : Gözlem sayısı

5.5. TAGUCHİ SİNYAL/GÜRÜLTÜ ORANLARI

Değişkenleri azaltmak için gerçekleştiren deney tasarımı en iyi değer belirlenmesi amaçlanmış olup, adına da sinyal/gürültü oranı denilmiştir ve bir takım matematiksel kurallar dâhilinde geliştirilmiştir. Taguchi, problemlerin türüne göre altmışın (60) üzerinde hedef türü belirlemiştir. Bu hedef faktörlerden en önemlileri ise üç (3) adet olup, her bir için farklı bir sinyal/ gürültü oranı belirleyerek tanımlamıştır [55].

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;

$$\frac{S}{N} Oranı = -10 \cdot \log \left(\sum \frac{Y^2}{n} \right) \quad (5.3)$$

En büyük – En iyi; sonuç parametre değerinin maksimum olması istenilen durumlarda tercih edilir örneğin mekanik sertlik gibi.

Y'nin hedef değeri sonsuzdur ve sinyal/gürültü oranı;

$$\frac{S}{N} Oranı = -10 \cdot \log \left[\sum \left(\frac{1}{Y^2} \right) / n \right] \quad (5.4)$$

Hedef değer – En iyi

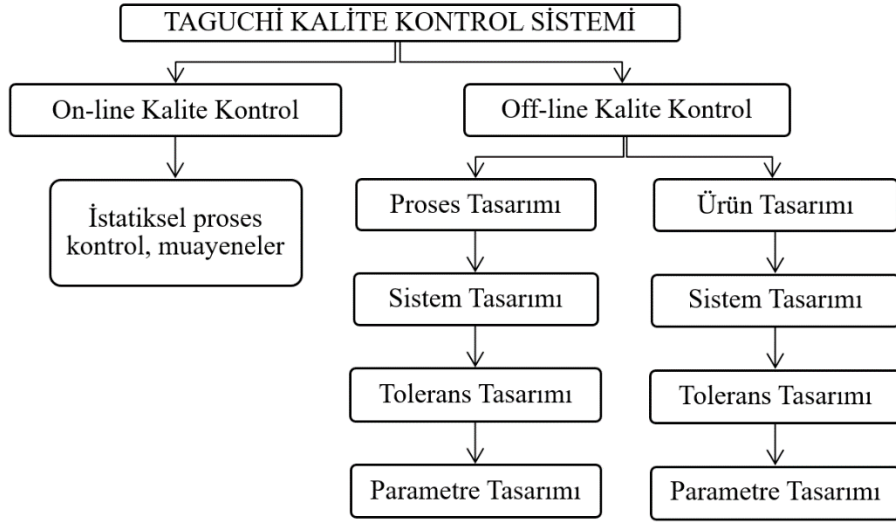
Y için belli bir hedef değer belirlenmiştir.

$$\frac{S}{N} Oranı = -10 \cdot \log \left(\frac{Y^2}{S^2} \right) \quad (5.5)$$

Bu problemlerin tümünde amaç, S/G oranını en iyi elde etmektir.

5.5.1. Taguchi'nin Üretim Kalite Sistemi

Taguchi'nin kalite kontrol sisteminde, kaliteyi yakalamak için yapılan faaliyetler, Şekil 5.3'de gösterildiği gibi On-line (üretim içi) kalite kontrol ve Off-line (üretim dışı) kalite kontrol olmak üzere iki grupta incelenmektedir [55].



Şekil 5.3. Taguchi kalite kontrol sistemi [58].

Üretim içi kalite sistemi imalat süreci, teslim, servis gibi aşamalardan oluşurken; üretim dışı kalite sistemi de pazar araştırması, ürün ve proses geliştirme gibi merhalelerden meydana gelmektedir. Yani Taguchi, bir yandan da önemli olanın sadece imalat ve imalattaki ortaya çıkan koşulların değil, imalat öncesi şartların ve bu konudaki tedbirlerin de önemli olduğunu ifade etmektedir. Bu sayede deneysel tasarımın daha etkili olacağını savunmuş ve kalite kontrol sisteminde yeni bir çığır açmıştır [59].

Günümüzde ise, teknolojinin gelişmesi ile birlikte insanların ihtiyaçlarında artış gözlenmektedir. Artık müşteriler maksimum fayda beklemekte, kalite koşullarını ön planda tutmakta ve kendi beklentilerini en üst düzeyde tutmaktadır [59].

5.5.2. On-line (Çevrim içi) Kalite kontrol

Ürün imalatı esnasında ve imalat sonrası kalite faaliyetlerini kapsar. İstatistiksel proses kontrolü ve çeşitli muayeneler, on-line kalite kontrol faaliyetlerindedir. On-line kalite kontrol faaliyetleriyle üretim direkt olarak takip edilmekte, kalitenin kaybının nasıl ve ne şekilde olduğu ölçülmekte ve potansiyel problemlerin etkileri belirlenmektedir. Üretim boyunca değişkenliğe sebep olan ve böylelikle ürün kalitesini etkileyen kaynakları;

- Malzemedan (ham ve yardımcı malzeme) ve satın alınan ekipmandan kaynaklanan değişkenlikler,
- İş akışından, kullanılan teçhizat, makine arızalarından vb. kaynaklananlar,
- Yöneticilerden ve personelden kaynaklananlar,
- Üretim sürecinden kaynaklanan değişkenlikler şeklinde sıralayabiliriz [60].

5.5.3. Of-line (Çevrim dışı) Kalite Kontrol

Pazar araştırması ile ürün ve üretim süreçlerinin geliştirilmesi esnasında başvuru kalite faaliyetlerini içermektedir. Bu faaliyetler üretimin öncesinde gerçekleştirilen tasarım çalışmalarınıdır [55].

Off-line kalite kontrol sisteminin diğeri bir faaliyet alanı da müşterilerin ihtiyaç ve talepleri doğrultusunda ürün kalitesini belirlemektir; çünkü kalitenin diğeri bir tanımı da müşteri memnuniyetidir. O yüzden bu tür imalat dışındaki tedbirler, kaliteyi amaçlayan bir sistemde olması gereken esaslardandır.

5.5.3.1. Sistem Tasarımı

Sistem tasarımı bu yöntemin ilk aşamasıdır. Bu aşamada var olan bütün materyaller değerlendirilir, buna paralel olarak var olan teknolojik gelişmeler irdelenerek sistemde kullanılabilirliği üzerine fizibilitesi yapılır. Bu aşamanın temel amacı minimum maliyetle en iyi ürün tasarımı elde etmek ve maksimum düzeyde müşteri memnuniyeti sağlamaktır [54].

5.5.3.2. Parametre Tasarımı

Parametre Tasarımı, Taguchi metodunun en önemli aşamasıdır. Ürün kalitesini etkileyen faktörlerin belirlendiği ve bu faktörlerin ürüne olan etkisinin en az kılınmaya çalışıldığı bir tasarımı gerçekleştirme aşamasıdır. Taguchi bunu sağlamak için, istatistiksel deney tasarımı yöntemlerini kullanır [54].

5.5.3.3. Tolerans Tasarımı

Belirlenen parametreler sonucunda, istenilen hedefe ulaşılmadığı durumlarda yapılan ilave çalışmalardır. Bu aşamada elde edilen verilerden faydalanılarak ürünün hedef değerden sapma göstermesi sonucundaki kayıplar bulunur ve bu sapmalar azaltılır [54].

5.5.4. Robust Tasarımı

Robust tasarımının ürün performansını geliştirmeye olan katkısından ötürü Taguchi'nin hedeflediği birçok istatistiksel yöntemin çok önemli olduğu kabul edilir. Bu yöntemler sinyal/gürültü oranı, ortogonal diziler, doğrusal grafikler ve toplama analizidir.

Robust tasarımının kullanılması ile birlikte kullanıcılarına, daha avantajlı, etkin ve kullanımı kolay teknik ve araçlara sahip olması bakımından popüler olmuştur [61].

Taguchi, üründe ve proseste, değişkenlik (hedeflenen değerden sapma) yaratan kontrol

edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin (parametrelerin) değerlerini optimal seçerek, ürün veya proseste meydana gelen değişkenliği en aza indirmek gerektiğini söylemektedir. Sağlam tasarım ifadesindeki sağlam kelimesi, kontrol edilemeyen etkenlere, örneğin; nem, toz, ısı gibi çevresel koşullarına, müşteri kullanımındaki farklı uygulamalara ve malzemedeki farklılıklara karşı duyarsız, yani onlardan etkilenmeyen, ürün ve proses anlamında kullanılmaktadır [62].

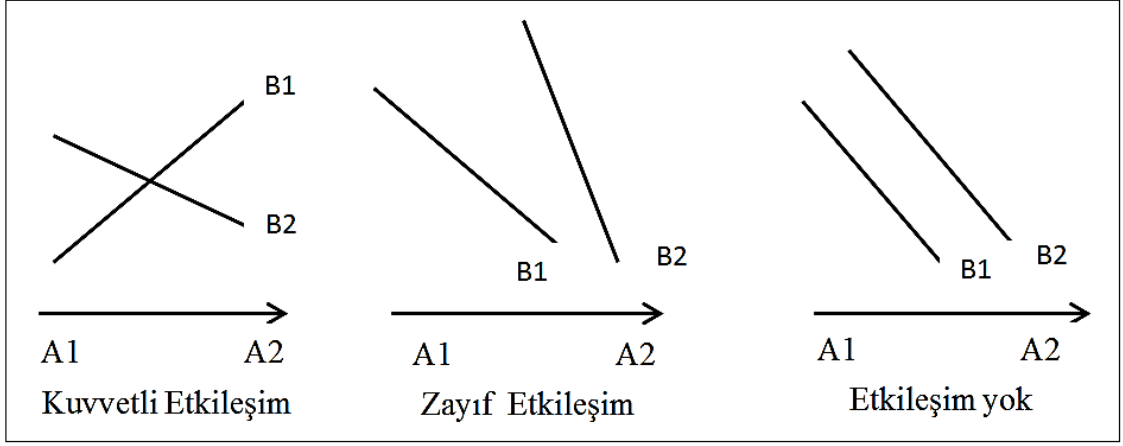
Robust; kontrol edilebilen faktörlerin seviyelerini, kontrol edilemeyen faktörlerin ürün üzerine olan etkilerini en aza indirecek şekilde belirleyen tasarım metodudur.

5.5.5. Değerlendirilecek Faktör ve Faktör Etkileşim Seçimi

Mevcut problemin çözümü ile ilgili hedefler ortaya koyulduktan sonra klasik tasarımda sıkça başvurulan, beyin fırtınası, süreç akış şeması ve sebep-sonuç diyagramı gibi yöntem ve teknikler kullanılarak, değerlendirmeye alınacak faktör veya etkileşimler seçilmektedir. Taguchi, faktörleri kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörler olarak ikiye ayırmaktadır. Faktör düzeyleri belirlenmeden önce var olan faktörler belirlenerek bu faktörler, kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörler olarak ayrılmaktadır. Kontrol edilebilen faktör sayısına göre tasarım belirlenmekte ve denemeler yapılmaktadır.

5.5.6. Faktör Düzeylerinin Seçilmesi

Performans karakteristiğini etkileyen faktörler belirlendikten sonra bu faktörlerin düzey sayısı belirlenmektedir. Faktörlerin seviyeleri iki, üç veya daha çok olabilmektedir. Faktör seviyeleri serbestlik dereceleriyle ilişkili bir fonksiyondur. Serbestlik derecesi, faktör seviyelerinden hareketle hesaplanmaktadır. Serbestlik derecesi, deneyin büyüklüğünü tespit etmek açısından önemlidir. Bir faktörün serbestlik seviyesi, o faktörün seviyesinin bir eksigidir. Ayrıca, faktörlerin bireysel etkilerinin yanı sıra faktörler arası oluşan etkileşimler de belirlenir. Bu etkileşim etkilerine interaction effects denmektedir. Böyle bir durum söz konusu olduğunda etkileşim için serbestlik derecesi; etkileşen faktörlerin serbestlik derecelerinin çarpımıdır. Ayrı ayrı her faktörün serbestlik derecesi toplamı, toplam serbestlik derecesini vermektedir. İki faktörün etkileşimli olması, bir faktörün (örneğin A), kalite değişkenine olan etkisi, diğer faktörün (örneğin B) hangi değerde bulunduğuna bağlıdır. Bu durum AXB olarak gösterilir. Etkileşimli ve etkileşimli olmayan faktörlerin grafikleri Şekil 5.4'de gösterilmektedir [63].



Şekil 5.4. Etkileşim grafik gösterimi [63].

5.5.7. Dikey Dizinler

Değişkenlerin, faktör ve seviyelerin fazla olması durumunda yapılan deneylerin fazladan zaman alacağı ve maliyeti artıracaklarını öngörmüştür. Taguchi bu sorunu gidermek için deney sayısının minimize edilmesi ve buna bağlı olarak oluşacak maliyet ve harcanacak zamandan tasarruf edilmesini ve sonuç olarak yapılacak deneylerde en uygun sonuçlar elde etmek için uzun çalışmalar sonucu dikey dizinler kuralını gerçekleştirmiştir [64].

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. MATERYAL

6.1.1. Ağaç Malzeme Sarıçam (*Pinus sylvestris L.*)

6.1.1.1. Botanik Özellikleri ve Yayılışı

Sarıçam değişik yetişme bölgelerine göre 20-40 m boylanan, gençlikte narin gövdeli, sivri tepeli ve ince dallı, yaşlılıkta dolgun gövdeli, yayvan tepeli ve kalın dallı bir ağaçtır. Genç gövdelerde, yaşlı ağaçların yukarı kısımlarında ve kalın dallarda kabuk sarımtırak kırmızı renktedir ve ince levhalar halinde ayrılır [65].

Uzun yumurta biçimindeki tomurcuk genellikle reçinesiz olup kurak bölgelerde reçinelidir. Kısa sürgünlerde ikili olan iğne yapraklar çeşitli yetişme muhitlerine göre 2 - 6 cm uzunlukta ve mavimtırak yeşil veya boz yeşil renktedir [65].

Yaprakları 4 - 8 cm boyunda ortalama ömrü 2 - 5 yıldır. Alt yüzeylerinde stoma izleri mevcuttur. Erkek çiçekleri vejetasyon mevsiminin başında belirmeye başlar. Çok sayıda etaminlerden oluşmaktadır. Her etaminin alt yüzünde iki adet çiçek tozu torbası bulunur. Dişi çiçekler ise kozalak ve çok sayıda çiçekten oluşan bir kurul halindedir. Her bir karpelin (pulun) üst yüzünde iki adet tohum tomurcuğu bulunmaktadır [66].

Çiçek evresinde pembe, sonra yeşilimsi, olgun evrede ise mat koyu sarı olan kozalaklar saplı olup aşağı doğru sarkarlar. Kozalaklar 3 - 6 cm uzunluğunda olup, dip tarafları çarpıktır. Rengi boz mat veya koyu sarıdır. Tohum küçük 3-4 mm, kanat kendisinden 3 - 4 kez daha uzundur. Primer yaprakları dişlidir [67].

Sarıçam Türkiye’de 740.000 hektarlık alanda doğal yayılış alanına sahip olup, Kuzeydoğu Anadolu’da Ardahan, Oltu, Posof ve Sarıkamış yörelerinde ortalama 2200 m yükseltilerde yoğun olarak bulunup, çoğunlukla saf meşcereler halindedir [68].

Çam ağacı dağlarında saf ya da Doğu Ladini ve Doğu Karadeniz Göknaarı ile karışım yaparak geniş ormanlar oluşturmaktadırlar. Batı Anadolu’da kesintili olarak Bursa, Eskişehir, Kütahya yörelerine kadar gelirler. Karadeniz iklimi etkisinin hissedildiği

Karadeniz dağlarının güney yamaçlarında ve Çoruh vadisinde 700 m'ye kadar inen Sarıçam; Kuzeydoğu Anadolu'da Ardahan, Oltu, Göle, Şenkaya dolaylarında çoğunlukla saf olarak 2700 m'ye kadar yükselir. Posof yöresinde saf veya ladin, göknar gibi diğer ağaç türleri ile karma ormanlar oluşturur [69].

6.1.1.2. Makroskopik Özellikler

Diri odunu 5 - 10 cm genişliğinde, sarımsı beyaz renkte olup öz odunu kırmızımsı sarı ve kırmızımsı kahverengindedir. Kesimden kısa bir süre sonra kesim yeri daha da koyulaşır. Yıllık halkaları sınırları belirgin olup hafif dalgalıdır. Yaz odunu koyu renkli olup, ilkbahar odunu açık rengi ile kontrast yaratır. Yetiştirme bölgesine bağlı olarak yıllık halkalar dar ve geniş olabilir. Radyal kesitte yaz odunu halkaları birbirine paralel şeritler halinde görülür. Öz ışınları çıplak gözle görülmemekle beraber sadece yaz odununda belirgin olabilir. Radyal kesitte enine, ince bantlar bulunur. Boyuna paranzimleri yoktur. Reçine kanalları büyük olup çok sayıdadırlar. Yaz odununda açık, ilkbahar odununda ise koyu lekeler halinde bulunurlar. Radyal ve teğet kesitte ise, boyuna çizikler halindedir. Odunu genellikle mattır. Yeni kesilmişleri reçine kokuludur. Dekoratif bir görüntüsü vardır. Odunu sert ve orta ağırlıktadır [70].

6.1.1.3. Mikroskopik Özellikler

Sarıçam odunun mikroskopik yapısı incelediğinde; bahar ve yaz odunu yıllık halka sınırları belirgin olup, yaz odunu traheidleri çok yassılaştırmıştır. Hücre çeperleri kalın olup dar lümenlidir. Traheidlerin çapı 10 - 50 µm, uzunlukları 1800 - 4500 µm'dir. İlkbahar odunundan yaz odununa geçişi oldukça hızlıdır. İlkbahar odunu traheidlerinin radyal çeperlerinde kenarlı geçitler büyük ve tek sıralıdır. Öz ışınları tek sıralı, reçine kanalı bulunan öz ışınları orta kısımda 2 - 5 sıralıdır. Öz ışın yükseklikleri çoğunlukla 1 - 12 hücre, bazen de 15 hücreden fazladır. Heterojen yapıdadır. Öz ışını traheidleri her iki tarafta 1 - 3 sıralı şekilde, bazen de öz ışınının içerisinde bulunmaktadır. Öz ışını paranzim hücrelerinin çeperleri ince olup, enine ve uç çeperlerde ise geçitler az sayıdadır. Karşılaşma yeri geçitleri 1 - 2 adet ve pencere şeklindedir. Boyuna paranzim hücreleri bulunmamaktadır. Boyuna reçine kanalları genelde yaz odunu içerisinde bulunurlar. Epitel hücre çeperleri incedir [70].

Ülkemizde doğal olarak yetişen diğer çam türlerinin genç ağaçlarında diri odun kısmı geniş, Sarıçam'da ise daha dardır. Kızılcım ağacının öz odun kısmı daha koyu ve yıllık halka sınırları kaba dalgalıdır [70].

6.1.1.4. Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Sarıçam odununun fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Sarıçam odununun fiziksel ve mekanik özellikleri [70].

Sarıçam Odununun Fiziksel Özellikleri	
Tam kuru haldeki yoğunluk	$D_0 : 0,49 \text{ g/cm}^3$
Hava kurusu haldeki yoğunluk (% 12)	$D_{12} : 0,52 \text{ g/cm}^3$
Radyal yönde daralma yüzdesi	$\beta_r : \%4$
Teğet yönde daralma yüzdesi	$\beta_t : \%7,7$
Hacmen daralma yüzdesi	$\beta_v : \%12,1$
Sarıçam Odununun Mekaniksel Özellikleri	
Elastikiyet modülü	E-mod : 11700 N/mm^2
Eğilme direnci	$\sigma_e : 98 \text{ N/mm}^2$
Çekme direnci	$\sigma_{\text{ç}} : 102 \text{ N/mm}^2$
Basınç direnci	$\sigma_b : 54 \text{ N/mm}^2$
Dinamik eğilme direnci	a : $0,39 - 0,70 \text{ kN/cm}$

6.1.1.5. Kurutma, İşlenme, Dayanıklılık ve Emprenye Özellikleri

Kolay kurutulur, çatlama ve dönüklüğe karşı eğilimi azdır. İşlenmesi kolay ve iyi derecede yapıştırılır. Üst yüzey işlemlerde, yapısında bulunan reçine sızıntısı nedeniyle güçlük çıkarır [70].

6.1.1.6. Kullanım Yerleri

Sarıçam odunu geniş kullanım alanına sahiptir. Telgraf ve telefon direkleri, demiryolu ray traversleri, inşaat alanında, döşemecilik, çatı ve döşeme kirişi, lambri, kaplama levha, kontrplak, plastik ve selofan yapımında, lif ve yonga levha ile kağıt ve mobilya endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [70].

6.1.2. Kriyojenik İşlem Ünitesi

Deneysel çalışmalar için Şekil 6.1’de görülen Alper ısıtma tesislerine ait Bilgisayar kontrollü doğrudan soğutma metodu ile çalışan Kİ sistemi kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Bilgisayar kontrollü, doğrudan soğutma metodu ile çalışan Kİ sistemi.

Numuneler, her bir Kİ sıcaklıkları (-140 °C, -100 °C, -40 °C) için ayrı ayrı uygulanmak üzere; ortalama 2 °C/dk hızla oda sıcaklığından istenilen sıcaklıklara kadar indirilmiş ve bu sıcaklıkta 2 saat bekletilmiştir. 2 saat sonunda yine ortalama 2 °C /dk hızla oda sıcaklığına çıkması sağlanmıştır.

6.1.3. Üniversal Test Cihazı

Şekil 6.2’de görüldüğü üzere U-TEST marka 50 kN kapasiteli bilgisayar destekli ve servo motor kontrollü olup, ahşap malzemenin çeşitli mekanik ve teknolojik terslerinin yapılmasına uygun olarak üretilmiştir. Birçok ek aparat ile birlikte farklı testlerin yapılmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 6.2. Üniversal test cihazı.

6.2. YÖNTEM

6.2.1. Deney Tasarımı

Çalışmada göz önünde bulundurulan faktörlerin, ahşap malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinde optimum işlem parametreleri ve faktörlerin etki düzeylerinin belirlenmesi amacıyla Taguchi Ortogonal deney tasarımı kullanılmıştır. Göz önünde bulundurulan faktör ve faktör seviyelerine göre L_9 ortogonal deney tasarımı kullanılmıştır. Çalışmada 2 faktör ve 3 seviye olması nedeniyle L_9 (3^2) ortogonal deney tasarımı belirlenmiş olup bu deney tasarımı aynı zamanda tam faktöriyel deney tasarımıdır. Bu çalışmada Taguchi yöntemi kullanılmasının temel amacı deney sayısını azaltmaktan ziyade mekanik özellikler üzerinde etkili olan kontrol faktörlerinin sonuç değer üzerindeki katkı düzeylerini ve optimal faktör seviyelerini belirlemektir. Çalışma kapsamında belirlenen L_9 ortogonal deney tasarımına göre deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulguların analizi Minitab 18 paket programı kullanılarak Taguchi yöntemi işlem basamaklarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

6.2.2. Ağaç Malzemenin Hazırlanması

Deneylerde mobilya endüstrisindeki yaygın kullanımları göz önüne bulundurularak Sarıçam (*Pinus sylvestris* Lipsky), odunu seçilmiştir. Keresteler İstanbul Keresteciler Sitesinden gelişigüzel seçim (Randomly Selected) yöntemi ile elde edilmiştir. Kerestelerin seçiminde TS 2470 standardına uyularak, sağlam, renk değişimine uğramamış, düzgün lif yapısına sahip ve lif kıvraklığı olmayan, ağaç kusurlarını içermeyen (böcek ve mantar zararlarına uğramamış, budaksız, çatlaksız) ve $\%12 \pm 2$ rutubet miktarına sahip olması gibi etmenler göz önünde bulundurulmuştur [71].



Şekil 6.3. Ağaç malzemenin satın alma aşaması.



Şekil 6.4. Deney örneklerin hazırlanması.



Şekil 6.5. Kİ öncesi ağaç malzemenin paketlenip gruplandırılması.

Hazırlanan örnekler Kİ'den önce, HK, LD ve SD rutubet miktarlarını elde etmek üzere üç gruba ayrılmıştır. HK yoğunluk değerleri TS 2472 esaslarına uyularak belirlenmiştir [72]. Örnekler 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve bağıl nemi $\%65 \pm 5$ olan iklimlendirme kabiniinde değişmez ağırlığa ulaşincaya kadar bekletilmiştir. LD rutubet miktarı Sarıçam örnekler için literatürde yaklaşık $\%30 \pm 2$ olarak belirtilmektedir [6]. Bu doğrultuda, deney örneklerini LD rutubet noktasına getirmek amacıyla 17 °C sıcaklıkta ve bağıl nemi $\%95$ olan iklimlendirme kabiniinde değişmez ağırlığa ulaşincaya kadar bekletilmek suretiyle LD rutubet miktarına bağlı örnekler hazırlanmıştır. SD örnekler için ise distile su ile doldurulmuş bir hazne içerisinde değişmez ağırlığa gelinceye kadar su altında bekletilmiştir.



Şekil 6.6. Örneklerin iklimlendirme dolabında kondisyonlanması.

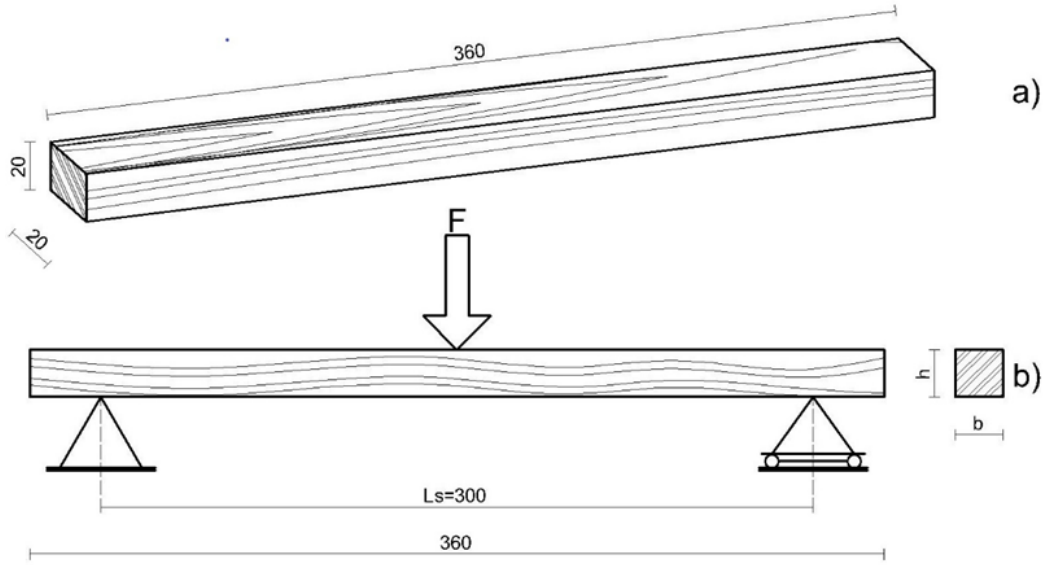


Şekil 6.7. Deney örneklerinin distile su içerisinde bekletilmesi.

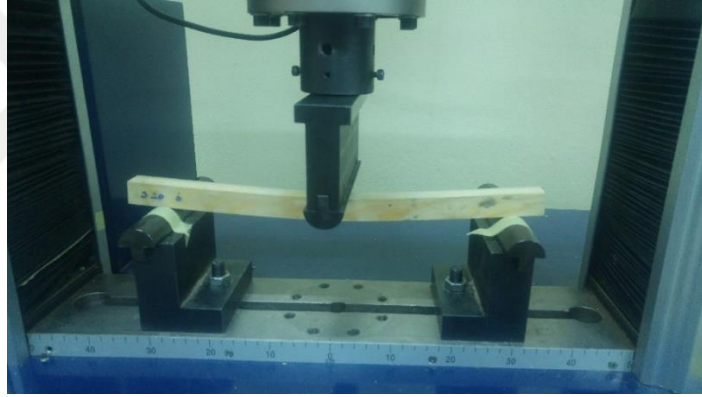
Bu çalışmada, her deney için altışar (6) adet örnek malzemelerin statik yük altındaki; liflere dik yönde ED ve EEM, liflere paralel yönde BD, ÇD, KD ve BS değerleri tespit edilmiştir.

6.2.2.1. Liflere Dik Eğilme Direnci ve Eğilmede Elastikiyet Modülü

Örneklerin liflere dik eğilme direnci (ED) özellikleri TS 2474 esaslarına uyularak belirlenmiştir [73]. Deney örnekleri, ağaç malzemeler için 360 x 20 x 20 mm, ölçülerinde olmak üzere altışar (6) adet hazırlanmıştır. Deneylerde yük örneklerin tam ortasından uygulanmış ve deney cihazının yükleme hızı kırılmanın $1,5 \pm 0,5$ dakikada gerçekleşmesini sağlayacak şekilde 2 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Liflere dik eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü deney numune örneği ve şematik gösterimi Şekil 6.8'de, deney yapılış anı ise Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Liflere dik ED ve EEM a) Deney numune örneği b) Deney şematik gösterimi (ölçüler mm'dir).



Şekil 6.9. Liflere dik ED ve EEM testi.

Deneylelerden elde edilen sonuçlar Eşitlik 6.1'de kullanılan formül ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_e = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L_s}{2 \cdot a \cdot b^2} \quad (kg/cm^2) \quad (6.1)$$

Burada;

σ_e : Eğilme direnci (N/mm^2)

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

L_s : Dayanak açıklığı (mm)

a : Deney örneğinin genişliği (mm)

b : Deney örneğinin kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

Örneklerin eğilmede elastikiyet modülü (EEM) özellikleri TS 2478 esaslarına uyularak belirlenmiştir [74]. Testlerde ED'nin belirlenmesinde kullanılan deney örneklerinden yararlanılmıştır. EEM, elastikiyet deformasyon bölgesinde uygulanan kuvvet farkı (ΔF) için örnekteki eğilme miktarları farkı (Δ_f) yardımı ile Eşitlik 6.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$E - mod = \frac{\Delta_F \cdot L_s^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta_f} \quad (6.2)$$

Eşitlikte;

E-mod : Elastikiyet modülü (N/mm²)

Δ_F : Elastikiyet bölgesindeki kuvvet farkı (N)

L_s : Dayanak açıklığı (mm)

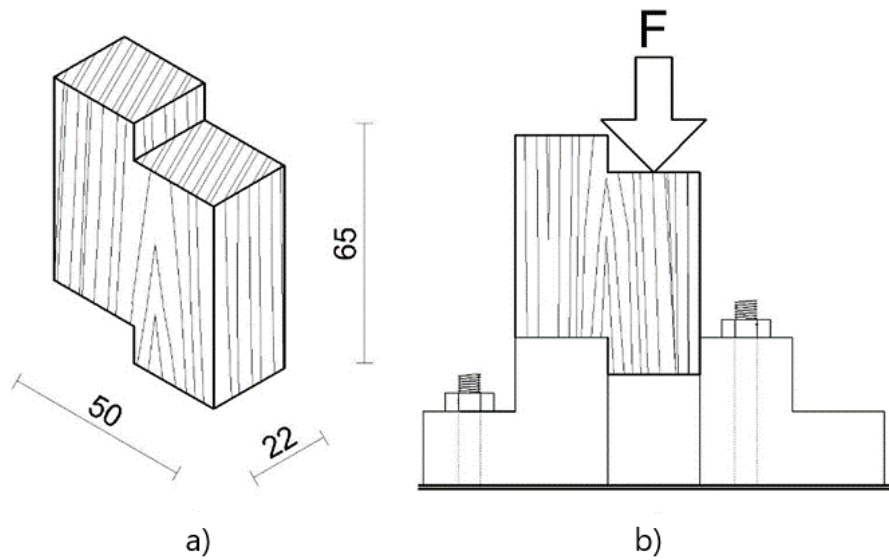
b : Deney örneğinin genişliği (mm)

h : Deney örneğinin yüksekliği (mm)

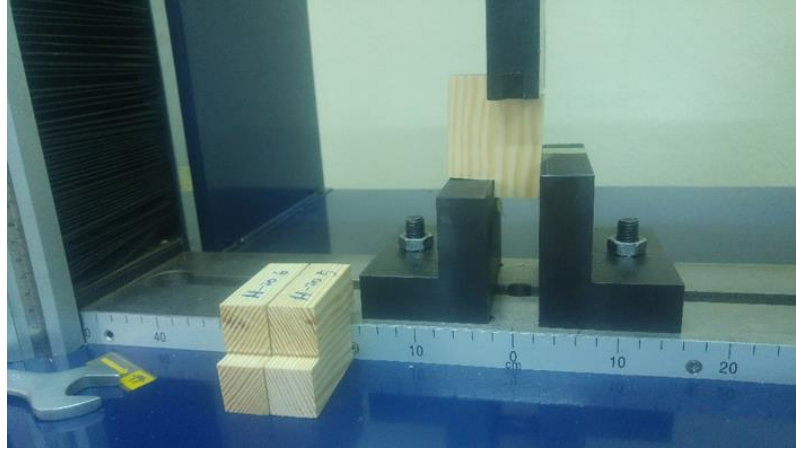
Δ_f : Eğilme miktarını (mm) ifade etmektedir.

6.2.2.2. Liflere Paralel Kesme (Makaslama) Direnci

Liflere veya yüzeye paralel kesme direncinin belirlenmesinde; masif ağaç malzemeler için TS 3459 (12) standardı esaslarına uyulmuştur [75]. Deney örnekleri, ağaç malzemeler için 22 x 50 x 65 mm, ölçülerinde olmak üzere altışar (6) adet hazırlanmıştır. Liflere paralel kesme direnci (KD) deney numune örneği ve şematik gösterimi Şekil 6.10'da, deney yapılış anı ise Şekil 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Liflere paralel KD a) Deney numune örneği b) Deney şematik gösterimi (ölçüler mm'dir).



Şekil 6.11. Liflere paralel KD testi.

Deneylerden elde edilen sonuçlar Eşitlik 6.3’de kullanılan formül ile hesaplanmıştır.

$$T_{w//} = \frac{P_{max}}{b \times l} \quad (N/cm^2) \quad (6.3)$$

Burada;

$T_{w//}$: Makaslama direnci (N/mm²)

P_{max} : Kırılma yükü (N)

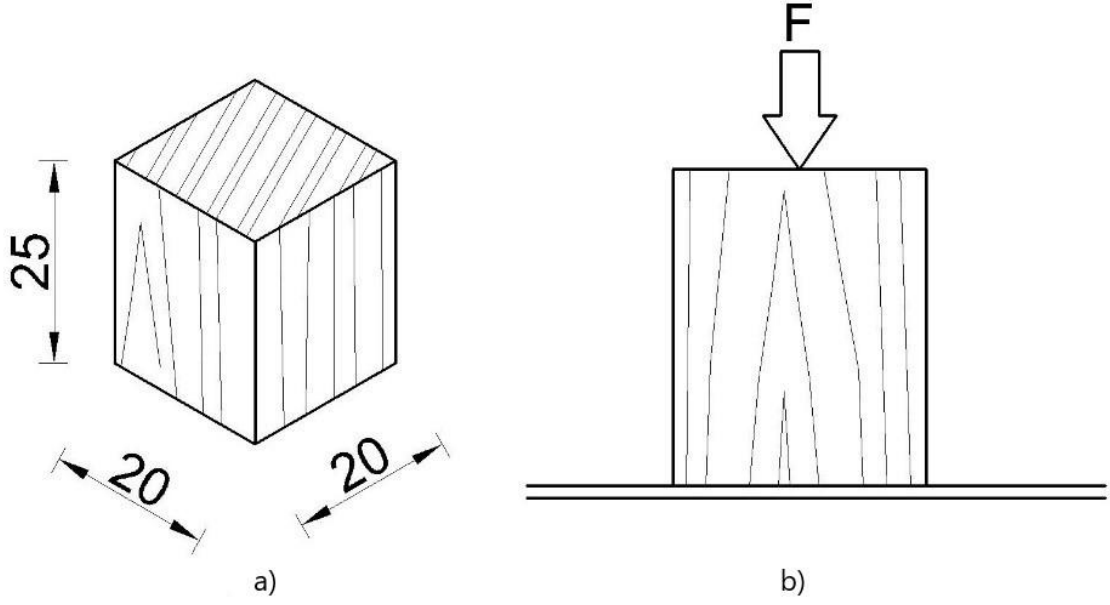
b : Deney numunesi kalınlığı (mm)

l : Makaslama yüzeyi uzunluğu (mm)

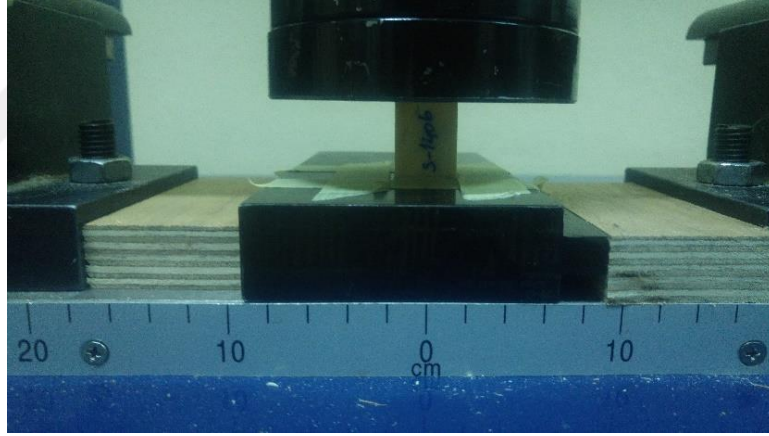
h : Enine kesit alanı (mm²)

6.2.2.3. Liflere Paralel Basınç Direnci

Liflere paralel basınç direncinin belirlenmesinde, TS 2595 standardı esaslarına uyulmuştur [76]. Liflere veya yüzeye paralel basınç direnci (BD) deneylerinde 20x20 kare kesitli ve lifler yönünde 25 mm uzunluğundaki numuneler kullanılmıştır. Deney örnekleri iklimlendirme odasında 20 ± 2 °C sıcaklık ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem şartlarında bekletilerek RM’si yaklaşık $\%12$ olması sağlanmıştır. İklimlendirme işleminden sonra, örneklerin kopma kesit yüzeyi boyutları $\pm 0,01$ mm duyarlılıkta kumpas ile ölçülmüştür. Deney örnekleri, her deney için altışar (6) adet hazırlanmış olup. Testler esnasında, Kırılma anındaki maksimum basınç kuvveti (P_{max}) skaladan okunarak, aşağıdaki formüle göre, liflere paralel basınç direnci değeri hesaplanmıştır. Liflere paralel basınç direnci deney numune örneği ve şematik gösterimi Şekil 6.12’de, deney yapılış anı ise Şekil 6.13’de gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Liflere paralel BD a) Deney numune örneği b) Deney şematik gösterimi (ölçüler mm'dir).



Şekil 6.13. Liflere paralel BD testi.

Deneylerden elde edilen sonuçlar Eşitlik 6.4'de kullanılan formül ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_{B//} = \frac{F_{max}}{a \times b} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (6.4)$$

Burada;

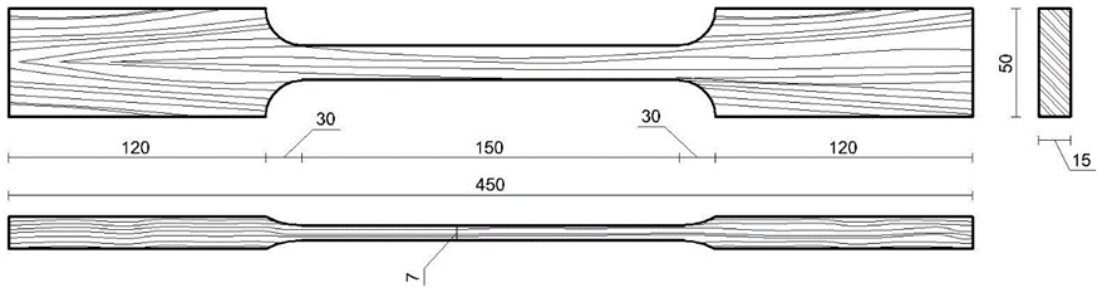
$\sigma_{B//}$: Liflere paralel basınç direnci (kg/cm²)

F_{max} : Kırılma anındaki maksimum yük (kg)

a ve b : Deney örneğinin enine kesit boyutları

6.2.2.4. Liflere Paralel Çekme Direnci

Liflere paralel çekme direnci (ÇD) deneyleri TS 2475 standardı esaslarına uyularak gerçekleştirilmiştir [77]. Deney örnekleri, her deney için altışar (6) adet hazırlanmış olup, ÇD deneyi örnekleri Şekil 6.14’de gösterilmiştir. Deney örnekleri iklimlendirme odasında 20 ± 2 °C sıcaklık ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem şartlarında bekletilerek rutubet miktarının yaklaşık $\%12$ olması sağlanmıştır. İklimlendirme işleminden sonra, örneklerin kopma kesit yüzeyi boyutları $\pm 0,01$ mm duyarlılıkta kumpas ile ölçülmüştür. Liflere paralel çekme direnci (ÇD) deney numune örneği Şekil 6.14’de, deney yapılış anı ise Şekil 6.15’de gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Liflere paralel ÇD deney numune örneği.



Şekil 6.15. Liflere paralel ÇD testi.

Deneylerden elde edilen sonuçlar Eşitlik 6.5’de kullanılan formül ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_{\zeta} // = \frac{P_{max}}{b \times h} \quad (N/mm^2) \quad (6.5)$$

Burada;

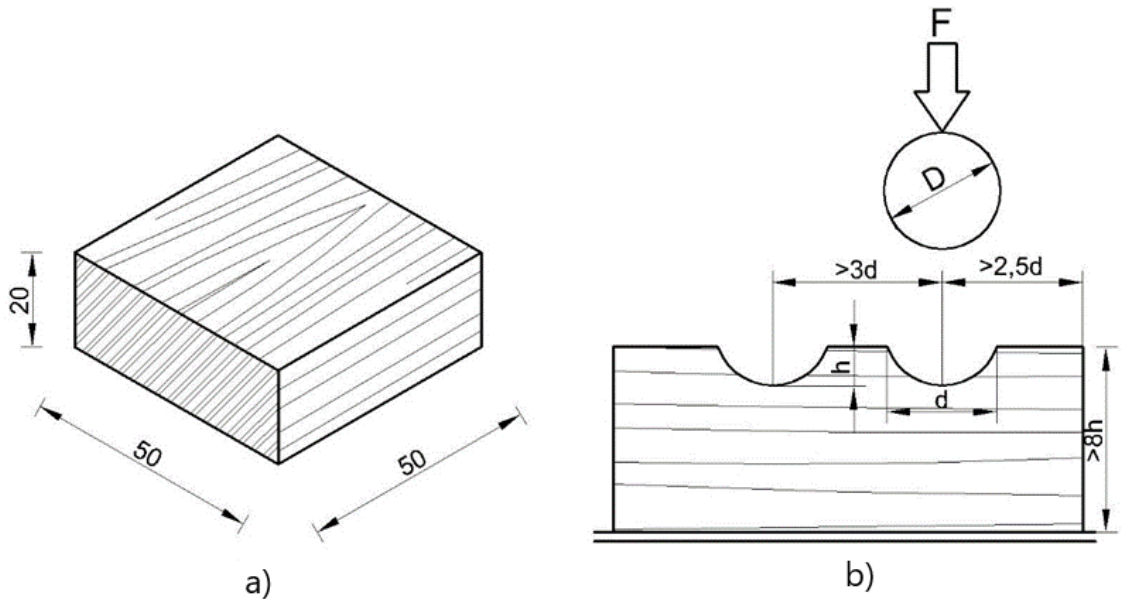
$\sigma_{\zeta} //$: Liflere paralel çekme direncini (kg/cm)

P_{max} : Kırılma anında oluşan yük (kg)

b ve h : Enine kesit alanı (mm^2)

6.2.2.5. Brinell Sertlik

Brinell sertlik (BS) deneyi TS 2479 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [78]. Deney örnekleri, ağaç malzemeler için 20 x 250 x 50 mm, ölçülerinde olmak üzere altışar (6) adet hazırlanmıştır. Kuvvet uygulama kolunun ucunda bulunan 10 mm çapındaki (D) yarım küre (çelik bilye) örnek yüzeyinin ortasına gelecek şekilde ayarlandıktan sonra yük uygulanmış, çelik kürenin örnek yüzeyinde açtığı çukurun çapı (d) $\pm 0,01$ mm hassasiyetindeki dijital kumpas ile büyüteç kullanılarak ölçülmüştür. Brinell sertlik değeri için deney numune örneği ve şematik gösterimi Şekil 6.16’da, deney yapılış anı ise Şekil 6.17’de gösterilmiştir.



Şekil 6.16. BS a) Deney numune örneği b) Deney şematik gösterimi (ölçüler mm’dir).



Şekil 6.17. BS testi.

Deneylerden elde edilen sonuçlar Eşitlik 6.6'da kullanılan formül ile hesaplanmıştır.

$$H_B = \frac{2.F}{\pi.D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (6.6)$$

Burada;

H_B : Brinell sertlik değeri (kg/mm^2)

F : Uygulanan kuvvet (kg)

D : Brinell sertlik küresi çapı (mm)

d : Çelik kürenin örnekte açtığı çukurun çapı (mm)

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ağaç malzemenin fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çok sayıda modifikasyon yöntemi kullanılmaktadır [10]. Kriyojenik işlem ise genellikle metal malzemelerin çeşitli özelliklerini iyileştirme amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada Kİ'nin metaller üzerinde sağladığı iyileştirici etkinin [25] ahşap malzemede de etkili olup olmayacağını belirlemek amaçlanmıştır. Bu çalışmanın yapılması fikri, ABD'de ahşap (Akça ağaç) beysbol sopalarına Kİ uygulamak suretiyle mekanik özelliklerinin iyileştirildiğini açıklayan US 2010 /0307170 A1 nolu patent etkili olmuştur [19]. Kİ'nin, ahşap malzeme mekanik özellikleri üzerine etkilerini tespit etmek amacıyla, farklı RM'ye kondisyonlanmış ve kriyojenik işleme maruz bırakılmamış numunelerin mekanik özellikleri, kriyojenik işleme maruz bırakılmış numuneler ile karşılaştırılmıştır. Bu amaç ile Çizelge 7.1'de farklı RM'ye sahip kriyojenik işleme maruz bırakılmamış numunelerin mekanik özellikleri için aritmetik ortalamalar verilmiştir.

Çizelge 7.1. Kİ uygulanmamış örneklerin farklı RM'ye göre mekanik özellikleri aritmetik ortalamaları.

Mekanik özellikler	RM		
	HK	LD	SD
ED (N/mm ²)	91,142	90,616	78,387
EEM (Mpa)	11190,50	9525,00	9566,50
KD (N/mm ²)	11,409	11,960	10,721
BD (N/mm ²)	49,672	47,176	49,397
ÇD (N/mm ²)	124,863	94,397	110,570
BS (N/mm ²)	19,62	19,34	18,09

Ahşap malzemenin içerdiği rutubet miktarı ve maruz kaldığı sıcaklığa göre mekanik özelliklerinin değiştiği bilinmektedir [3]–[5], [79]. Bu çalışmada, farklı rutubet miktarına sahip olan ahşap malzemelere farklı kriyojenik işlem sıcaklıklarının uygulanması sonucu ağaç malzemenin mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimler araştırılmıştır. RM olarak ahşap malzemenin bulunduğu ortamlarda yaygın olarak karşılaşılabileceği rutubet miktarı olan HK, LD ve SD rutubet miktarları kullanılmıştır. Kİ uygulanan sıcaklığa bağlı

olarak - 30°C'den -100°C'ye kadar olan sıcaklık aralığındaki işleme sıg kriyojenik işlem, - 140 °C' ve daha küçük sıcaklık aralığı ise derin kriyojenik işlem olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır [22], [23]. Bu çalışmada Kİ sıcaklıkları olarak -40, -100, - 140 °C kullanılmıştır. Bu sıcaklıkların kullanılmasında amaç sıg ve derin kriyojenik işlemin uygulanması durumunda ahşap malzeme mekanik özelliklerinde ortaya çıkabilecek olası değişimleri belirlemektir. Böylece her iki faktör için de düşük, ortalama ve yüksek faktör seviyelerinin etkileri araştırılmıştır. Çalışmada göz önünde bulundurulan faktörlerin, ahşap malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinde optimum işlem parametreleri ve faktörlerin etki düzeylerinin belirlenmesi amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Göz önünde bulundurulan faktör ve faktör seviyelerine göre L₉ ortogonal dizisi deney tasarımında kullanılmıştır. Çalışmada 2 faktör ve 3 seviye olması nedeniyle kullanılan L₉ (3²) ortogonal dizisi aynı zamanda tam faktöriyel deney tasarımıdır. Çalışmaya esas faktörlerden Kİ faktör A ve RM faktör B olarak kodlanmıştır. Ahşap malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek üzere, eğilme direnci (ED), eğilmede elastikiyet modülü (EEM), kesme direnci (KD), basma direnci (BD), çekme direnci (ÇD) ve Brinel sertlik (BS) değerleri ölçülmüştür. Ahşap malzemenin mekanik özelliklerine yönelik elde edilen ölçüm değerleri için tüm mekanik özelliklerde maksimum değerleri veren faktör parametreleri (Kİ ve RM'si) belirlenmiş ve Taguchi yöntemi kullanılarak deneysel parametreler optimize edilmiştir. Ayrıca her bir faktörün malzeme mekanik özellikleri üzerinde etkili olup olmadığı ve etki düzeylerini belirlemek amacıyla %95 güven düzeyinde varyans analizleri yapılmıştır. Varyans analizleri yanı sıra her bir faktörün mekanik özellikler üzerindeki katkı düzeyleri de belirlenmiştir. Ayrıca malzeme performans göstergesi olan mekanik özellikler ile bu özellikleri etkileyen kontrol faktörleri (Kİ ve RM) 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. Son olarak Taguchi yöntemi ile belirlenen optimum işlem parametrelerine göre doğrulama deneyleri yapılmış elde edilen Sinyal/Gürültü (S/G) verileri kullanılarak Taguchi tahmin modeli oluşturulmuş ve sonuç değerlere yönelik %95 güven düzeyinde tahminler yapılmıştır. Gerçekleştirilen doğrulama değerleri ile tahmin değerleri sonuçları karşılaştırılarak Taguchi yönteminin uygulama başarısı analiz edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde her bir mekanik özellik için elde edilen bulgular yukarıda bahsedilen değerlendirme yöntemine göre ayrı ayrı analiz edilmiş ve literatürdeki bilgilerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 7.2’de çalışmada kullanılan L₉ ortogonal deney tasarımı görülmektedir.

Çizelge 7.2. Deney faktörleri ve L₉ ortogonal dizini.

Deney Numarası	Değişkenler	Kİ (°C) (A)	RM (B)
1	A1B1	-140	HK
2	A1B2	-140	LD
3	A1B3	-140	SD
4	A2B1	-100	HK
5	A2B2	-100	LD
6	A2B3	-100	SD
7	A3B1	-40	HK
8	A3B2	-40	LD
9	A3B3	-40	SD

Bu çalışma için 9 deney tasarlanmış ve çalışmada güvenilirliği artırmak amacıyla deneyler altışar (6) kez tekrar edilmek suretiyle her bir mekanik özellik için 54 adet deney yapılmıştır. Değerlendirmeye alınan mekanik özellikler için optimum işlem parametrelerinin belirlenmesi amacıyla toplam 270 adet deney gerçekleştirilmiştir. Çalışmada göz önünde bulundurulmuş ağaç malzeme mekanik özelliklerinde arzu edilen değerlerin maksimum (en büyük) olması istenmektedir. Bu nedenle optimum faktör seviyelerinin belirlenmesi için sinyal-gürültü (S/G) oranları ve ortalama grafikleri için en büyük en iyi karakteristik seçilmiştir.

Çalışma kapsamında Sarıçam örneklerin mekanik özellikleri (ED, EEM, KD, BD, ÇD, BS) üzerinde etkili olan kontrol faktörlerinin (Kİ, RM) optimum seviyelerini belirlemek üzere Taguchi yöntemi her bir mekanik özellik için ayrı ayrı uygulanmıştır. Uygulamada belirlenen L₉ (3²) ortogonal dizisine göre deneyler gerçekleştirilmiş ve Taguchi yöntemi işlem basamakları sırasıyla uygulanmıştır.

7.1. LİFLERE DİK EĞİLME DİRENCİ DENEYSEL OPTİMİZASYONU

Liflere dik eğilme direnci, ahşap malzemenin lif doğrultusuna dik olarak tesir eden ve onu eğmeye çalışan kuvvetlere karşı gösterdiği dirençtir [80]. Genellikle malzemelerin yapı bileşeni olarak kullanıldıklarında maruz kalınan dikey yüklere karşı (örneğin kirişler,

traversler vb.) kullanım yerlerindeki davranış özellikleri ve maruz kalınan yükler altındaki dayanımlarının belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan temel bir ölçüttür.

Bu çalışmada, farklı RM'ye sahip Sarıçam örneklerin Kİ sıcaklıklarına maruz kalmaları durumunda mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. En yüksek ED'yi veren Kİ sıcaklıkları ve RM optimum parametrelerini belirlemek için Taguchi yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmanın bu bölümünde ED değerleri için Taguchi optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve optimum ED değerini veren RM ve Kİ parametreleri belirlenmiştir. Çalışmaya esas Taguchi L₉ deney tasarımına göre oluşturulan faktör kombinasyonları için elde edilen ED değerleri ile hesaplanan S/G oranları Çizelge 7.3'de verilmiştir.

Çizelge 7.3. Eğilme direnci için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.

Deney Numarası	Değişkenler	Kİ (°C) (A)	RM (B)	ED (N/mm ²)	ED-S/G Oranı (dB)
1	A1B1	-140	HK	93,176	39,386
2	A1B2	-140	LD	85,221	38,611
3	A1B3	-140	SD	82,982	38,380
4	A2B1	-100	HK	93,125	39,381
5	A2B2	-100	LD	82,221	38,300
6	A2B3	-100	SD	81,693	38,244
7	A3B1	-40	HK	84,809	38,569
8	A3B2	-40	LD	78,691	37,918
9	A3B3	-40	SD	76,699	37,696

Çizelge 7.3'den görüldüğü üzere, en yüksek ED değeri HK rutubet miktarında -140 °C'de kriyojenik işlem gören örneklerde (93,176 N/mm²), en düşük ED değeri ise -40 °C'de kriyojenik işlem gören SD rutubet miktarına sahip örneklerde görülmüştür (76,699 N/mm²). Gerçekleştirilen 9 deney sonucunda ED-S/G oranlarının ortalaması 38,498 dB olarak belirlenmiştir.

Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ve performans karakteristiği (ED) üzerinde bu faktörler arasından en etkili olanın belirlenmesinde Taguchi yöntemiyle oluşturulan S/G yanıt tablosu kullanılmaktadır. Bu tablodaki en büyük S/G değerleri, o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi göstermektedir. ED üzerinde her bir kontrol faktörünün etkisini

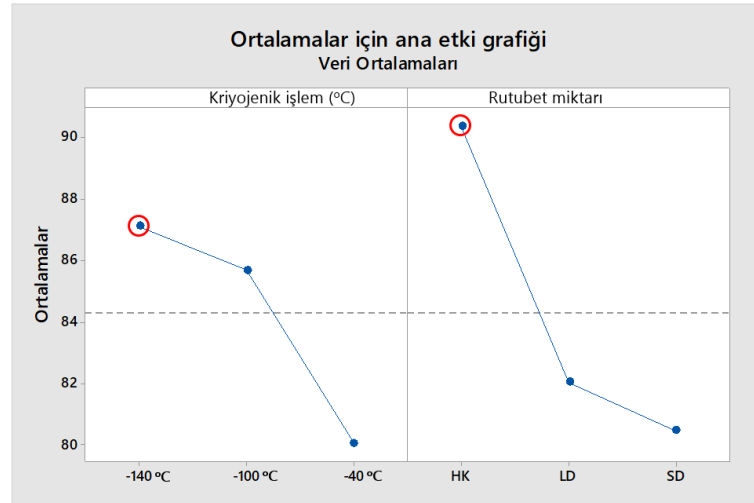
gösteren S/G yanıt tablosu Çizelge 7.4’de verilmiştir.

Çizelge 7.4. ED için S/G yanıt tablosu.

Seviyeler	Kİ	RM
Seviye 1	38,79	39,11
Seviye 2	38,64	38,28
Seviye 3	38,06	38,11
Delta	0,73	1,01
Sıralama	2	1

Çizelge 7.4 incelendiğinde ahşap malzemenin ED üzerinde kontrol faktörlerinden rutubet miktarının, Kİ sıcaklıklarına göre daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yapılan varyans analizi ile doğrulanmış ve her bir faktörün sonuç değer üzerindeki katkı düzeyleri belirlenmiştir. Bununla birlikte Sarıçam örneklerin ED değerinin optimum olduğu faktör seviyeleri RM ve Kİ sıcaklıkları birinci seviyelerinde elde edilmiştir (RM = HK ve Kİ sıcaklığı = -140 °C).

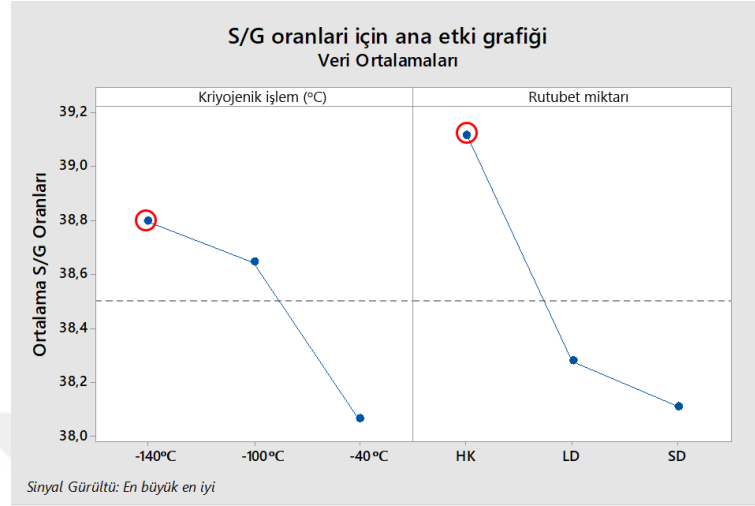
Kontrol faktörlerinin ED’ye göre optimum değerlerini gösteren ortalamalar için ana etki grafiği Şekil 7.1’de S/G oranları için ana etki grafiği ise Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Ortalamalar için ana etki grafiği (ED).

Malzemenin kullanım yerinde ED değerinin olabildiğince yüksek olması arzu edilmektedir. Bu nedenle gerek ortalamalar için ana etki grafiğinde gerekse S/G oranları için ana etki grafiğinde en yüksek değere sahip kontrol faktörü değerini sağlayan faktör seviyeleri o parametreye ait optimum seviyeyi göstermektedir. Şekil 7.1 ve 7.2’de

görüldüğü üzere ED değeri için optimum işlem parametrelerinin her iki kontrol faktörünün de birinci seviyesi olan -140 °C Kİ sıcaklığında ve HK rutubet miktarında (A1B1) elde edildiği görülmektedir.

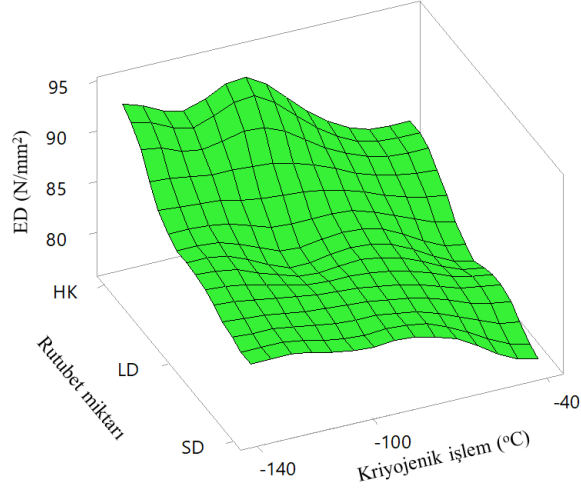


Şekil 7.2. S/G oranları için ana etki grafiği (ED).

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de görüldüğü üzere farklı RM ve Kİ sıcaklığına maruz bırakılmak suretiyle modifiye edilen Sarıçam örnekler için Kİ sıcaklığı düştükçe ve RM azaldıkça ED değerinin artış gösterdiği görülmektedir. Bu sonuçlar ahşap malzemede RM’nin ED’yi olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Ahşap malzeme RM’sine bağlı olarak ED değerlerindeki değişim incelendiğinde RM arttıkça ED’nin tedrici olarak azaldığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarından bağımsız olarak Rutubet miktarının ED üzerindeki etkisi dikkate alındığında en yüksek ortalamasının (90,37 N/mm²) HK rutubet miktarına sahip örnekler olduğu görülmektedir. Rutubet miktarından bağımsız olarak kriyojenik işlem sıcaklıklarının ED üzerindeki etkisi dikkate alındığında ise en yüksek ED ortalamasının (87,12 N/mm²) -140 °C’de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak Sarıçam örnekler için optimum faktör seviyeleri - 140 °C’de kriyojenik işlem sıcaklığı ve HK rutubet miktarı (A1B1) olarak belirlenmiştir.

7.1.1. Eğilme Direnci İçin Deneysel Sonuçların Yorumlanması

Sarıçam örnekler L₉ (3²) ortogonal dizisine göre uygulanan deneyler sonucu kontrol faktörlerine bağlı olarak ED değerleri belirlenmiştir. Kullanılan Kİ sıcaklıkları ve RM’ye göre eğilme direnci değerlerindeki değişimler Şekil 7.3’te verilmiştir.



Şekil 7.3. Kİ ve RM'nin ED üzerindeki etkisi.

Şekil 7.3'ten anlaşılacağı üzere genel olarak ahşap malzeme ED değerlerinin yaklaşık olarak 76 N/mm^2 ile 94 N/mm^2 arasında değiştiği görülmektedir. Tüm örnekler göz önünde bulundurulduğunda ED değerlerinin RM ve Kİ sıcaklığı arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu değişim RM'ye bağlı olarak belirgin bir şekilde azalırken Kİ'ye bağlı olarak görece daha az etkilendiği görülmektedir. Şekil 7.3'den görüldüğü üzere en yüksek ED değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde, en düşük değeri ise SD örneklerde görülmüştür. Bu durum rutubet miktarındaki artışın eğilme direncini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde uygulanan Kİ'ye bağlı olarak ED değerlendirildiğinde Kİ sıcaklıkları pozitif sıcaklıklara yaklaştıkça ED değerlerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 7.3'den Kİ'ye göre ED değerlerindeki değişim incelendiğinde, en yüksek ED değerinin $-140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de Kİ'ye maruz kalan örneklerde görülürken en düşük ED değerinin $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de Kİ'ye maruz kalan örneklerde ortaya çıktığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarına bağlı olarak, $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sıcaklık düştüğünde %7'lik bir iyileşme olduğu, $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sıcaklık düştüğünde ise ED değerinde %2'lik bir iyileşme olduğu görülmektedir. Bu durum derin kriyojenik işlemin sığ kriyojenik işleme göre ED değeri üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak ahşap malzeme rutubet miktarından bağımsız olarak kriyojenik işlem uygulamasının malzemenin ED üzerinde olumlu bir etki sağladığını göstermektedir. Uygulanan kriyojenik işlem sıcaklığından bağımsız olarak ahşap malzemenin rutubet miktarına bağlı ED değerleri incelendiğinde ise tüm örneklerde en düşük ED değerleri SD rutubet miktarına sahip örneklerde ölçüldüğü görülmüştür. Rutubet miktarına bağlı ED değerlerindeki değişim HK rutubet miktarı ile LD rutubet miktarı arasında yaklaşık

%10 iken LD rutubet miktarı ile SD rutubet miktarına sahip örneklerdeki değişim yaklaşık %2 oranında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar LD rutubet noktasının üzerinde rutubet miktarına sahip olunmasının malzemenin mekanik özellikleri üzerinde daha az değişime sebep olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Bu durum literatürdeki çalışmalar ile uyumludur. Ahşap malzemenin RM'ye bağlı olarak mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimi ele alan çok sayıda çalışmada artan RM'nin ağaç malzeme mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Gerhards (1982), yaptığı çalışmada ağaç malzeme rutubet miktarındaki (RM) değişimin malzeme mekanik özellikleri üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla %12 (HK) rutubete sahip örneklerin mekanik özellikleri ile bu rutubet miktarının altında ve üstündeki rutubet miktarına sahip ağaçların mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmalar literatürde yapılmış daha önceki çalışmaların bir özeti niteliğindedir. Sonuç olarak ağaç malzeme RM %12'den %6 oranına düştüğünde ED değeri %30 oranında artarken RM %20 oranına arttığında %25 azaldığını ortaya koymaktadır [5].

Isıl işlem ile kriyojenik işlemin ahşap malzeme ED değeri üzerine etkileri karşılaştırıldığında, ısıl işlem sonrası ahşap malzemedeki direnç kayıplarının oluştuğu, bu kaybın ağaç malzemelerdeki ısıl işleme bağlı olarak meydana gelen kütle kaybı ile ilgili olduğu düşünülmektedir [81]. Yapılan literatür taramasında Doruk & Perçin (2010)'e ait ısıl işlemin ağaç malzeme mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştıran çalışmada Sarıçam örneklerinin artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak kontrol grupları ile ısıl işleme maruz kalmış numunelerin kıyaslanması sonucunda, ED'nin 200 °C'de 10 saat ısıl işlem gören numunelerinde %15,24 oranında kayıplar yaşandığını belirtmiştir [82]. Kriyojenik işlemin ağaç malzeme ED üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile Kİ'ye maruz bırakılan ED numune değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde -140 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %2,2, SD örneklerde %5,8 oranında bir iyileşme olduğu ve LD örneklerde ise %5,9'luk bir kayıp olduğu gözlenmiştir. -100 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %2,1, SD örneklerde %4,2 oranında bir iyileşme olduğu ve LD örneklerde ise %9,2'lik bir kayıp olduğu gözlenmiştir. Son olarak -40 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %6,9, LD örneklerde %13,1 ve SD örneklerde ise %2,1 oranında bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Literatürden de görüldüğü üzere pozitif yüksek sıcaklıklarla ahşap malzemenin modifikasyonu olan ısıl işlem ED'nin 200 °C'de 10 saat ısıl işlem gören numunelerinde %15,24 oranında kayıplar yaşandığını, kriyojenik işlem sıcaklığına maruz bırakılan HK ve SD örneklerde tam

tersine yaklaşık %2 ila %6 arasında değişen iyileştirmeler olduğu görülmüştür.

7.1.2. Eğilme Direnci İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizi (ANOVA), deney tasarımında kullanılan kontrol faktörlerinin birbirleri ile etkileşimlerini ve performans karakteristiği üzerinde etki seviyelerini saptanmak amacı ile kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [64]. Bu çalışmada kontrol faktörü olan kriyojenik işlem ve rutubet miktarı değerinin ED üzerindeki etkilerini tespit etmek amacıyla yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 7.5’de verilmiştir. Eğilme direnci için varyans analizi %95 güvenirlilik düzeyinde değerlendirilmiştir.

Çizelge 7.5. ED için ANOVA sonuçları.

Kontrol faktörü	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F değeri	P değeri (P<0,05)	Katkı oranı (%)
Kriyojenik işlem	2	83,450	41,725	26,35	0,005*	32,11
Rutubet miktarı	2	170,064	85,032	53,70	0,001*	65,45
Hata	4	6,334	1,584			2,44
Toplam	8	259,848				100

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

Çizelge 7.5’ten görüldüğü üzere her bir değişkenin önem seviyesini gösteren F değerleri ve yüzde etki oranları görülmektedir. Çizelgede belirtildiği üzere F değeri en yüksek olan kontrol faktörü, performans karakteristiğine en fazla etki eden faktördür. ED değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre ED üzerinde en etkili parametrenin %65,45 oranıyla RM olduğu ve Kİ’nin ise %32,11 gibi bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Örneklerin eğilme direnci üzerinde Kİ ve RM faktörlerinin etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür ($P \leq 0,05$).

7.1.3. Eğilme Direnci İçin Regresyon Analizi

Regresyon analizi bir bağımlı değişken ile bir veya daha çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir. Bir tek bağımsız değişkenin kullanıldığı regresyon tek değişkenli regresyon analizi, birden fazla bağımsız değişkenin kullanıldığı regresyon analizi de çok değişkenli regresyon analizi olarak adlandırılmaktadır [83].

Regresyon analizinin temeli, gözlenen bir olayın hangi olayların etkisi altında olduğunun araştırılması esasına dayanmaktadır. Regresyon analizi yapılırken, gözlem değerlerinin ve etkilenilen olayların bir matematiksel gösterimle yani bir fonksiyon yardımıyla ifadesi gerekir. Matematiksel bir ifade olan bu fonksiyona regresyon modeli denilmektedir. Regresyon analizi ile oluşturulan matematiksel modelde yer alan değişkenler, bir bağımlı değişken ve bir veya birden çok bağımsız değişkenden oluşmaktadır.

Regresyon modelinde bu prensipler dikkate alındığında ED bağımlı değişken olarak etkilenen değişken olup, bağımsız değişkenler ise; Kriyojenik işlem sıcaklıkları (-140 °C, -100 °C, -40 °C) ve rutubet miktarları (HK, LD, SD) bağımsız değişkenlerdir. Bu bağlamda, yapılan çalışmada liflere dik eğilme direnci, Kİ ve RM arasındaki etkileşimden faydalanarak, regresyon analizi ile elde edilen ikinci dereceden matematiksel model aşağıda sunulmuştur.

$$ED = 95,17 - 0,1739 KI - 18,43 RM - 0,000574 KI * KI + 3,369 RM * RM \quad (7.1)$$

$$R^2 = \%97,56$$

Eşitlik 7.1’de ikinci dereceden quadratik regresyon denklemi elde edilmiştir. R^2 regresyon denkleminin belirleme katsayısını ifade etmektedir. Her bilim dalında veya 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. Pearson katsayısına göre; R^2 ’nin 0,80 ve üzeri olması, kuvvetli ilişki olarak kabul edilmekle beraber, 0,50 – 0,75 arası orta seviyeli ilişki derecesi olarak sayılmaktadır [84], [85]. Bu durumda, Eşitlik 7.1 incelendiğinde değişkenler arasında kuvvetli bir ilişki olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel çalışmada bağımlı değişken olan eğilme direncinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülerek göz önünde bulundurulan bağımsız değişkenlerin (Kİ ve RM) doğru tahmin edildiği ve eğilme direncindeki değişimi yaklaşık %97 oranında açıkladığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, regresyon modeli ile yapılan çalışmada iyi bir öngörüle bulunulduğu ve çalışmanın realiteler ile paralel olduğu sonucuna varılmaktadır.

7.1.4. Doğrulama Deneyleri ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması

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. Bu durumda optimum deneysel parametrelerin bireysel etkileri göz önünde bulundurularak A1B1 için maksimum ED tahmin değeri (ED_t) aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır. Bu değerlerin hesaplanmasında Çizelge 7.4 (ED için S/G yanıt tablosu) ve aşağıdaki eşitlikler kullanılarak S/G oranları gerçek değerlere dönüştürülmek suretiyle tahmin yapılmıştır [86].

$$\eta_g = A1 + B1 - \eta_{S/G} \quad (7.2)$$

$$ED_t = 10^{\eta_g/20} \quad (7.3)$$

Eşitlik 7.2’de A1 ve B1 faktörlerin optimum seviyelerine ait S/G oranlarıdır. $\eta_{S/G}$, bütün faktörlerin S/G oranlarının ortalamasıdır. Eşitlik 7.3’de η_g , optimum seviyeler için hesaplanan S/G oranıdır. Bu değerler dikkate alındığında optimum seviyeler için tahmin $ED_t = 93,35 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin doğruluğu için güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı maksimum ve minimum bir değerdir.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,Ve} \times V_{ep} \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (7.4)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (7.5)$$

Eşitlik 7.4.’de $F_{\alpha,1,Ve}$ önem düzeyi α ’nın F oranı, α önem düzeyi (%95), $1 - \alpha$ güven aralığı, Ve hatanın serbestlik derecesi, V_{ep} hatanın varyansı, r doğrulama deney sayısı ve n_{eff} etkin ölçülen sonuçların sayısıdır. Eşitlik 7.5’de $N = 9$ toplam deney sayısını, $V_t = 4$ Çizelge 7.5 dikkate alınarak deney parametrelerine ait toplam serbestlik derecesini ifade etmektedir [86]. Buna göre $n_{eff} = 1,8$ olarak bulunmuştur. ED için %95 güven aralığında yapılan değerlendirmede $Ve = 4$ dikkate alınarak $F_{\alpha,1,Ve} = 7,71$ olarak bulunmuş ve $V_{ep} = 1,584$ olarak Çizelge 7.5’ten okunmuştur. Bu çalışmada optimum parametreler kullanılarak 3 doğrulama deneyi yapılmıştır. Dolayısı ile Eşitlik 7.4 ve 7.5 kullanılarak $CI = 3,29$ olarak hesaplanmıştır. ED için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu %95 güven aralığı dikkate alınarak $(93,35 \text{ N/mm}^2 \pm 3,29)$ ya da $(90,06 - 96,64 \text{ N/mm}^2)$ arası beklenmektedir. Optimum faktör seviyeleri dikkate alınarak yürütülen 3 adet doğrulama deneylerinde ED değerleri sırasıyla 81,196, 83,859, 121,723 N/mm^2 olarak elde edilmiş

ve bunların ortalaması 95,593 N/mm² olarak hesaplanmış, doğrulama deneyleri ortalaması belirlenen güven (90,06 < 95,593 < 96,64 N/mm²) düzeyinde gerçekleşmiştir. Çizelge 7.6'da Taguchi metodu ile elde edilen tahmin değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tahmin değerler ile gerçek deneysel sonuçların hata oranı %20'den düşük olmalıdır [87].

Çizelge 7.6. ED İçin Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Faktör Seviyeleri	ED Deneysel	ED _t (N/mm ²)	Hata (%)
A1B1 (Optimum)	95,593	93,35	2,35
A2B2 (Rastgele)	82,221	83,38	1,4

Çizelge 7.6'da görüldüğü üzere tahmin hatası çok küçük çıkmış olup (< %20) ED deneylerine Taguchi metodu başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

7.2. EĞİLMEDE ELASTİKİYET MODÜLÜ DENEYSEL OPTİMİZASYONU

Eğilmede elastikiyet modülü (EEM), dış kuvvetler tarafından etki altında bulundurulmuş bir sistemde; onu, doğal büyüklük ve şeklini koruması için zorlayan ve yük kaldırıldığında tekrar orijinal durumuna ulaştırılmasına neden olan bir özelliktir [8], [80]. Ağaç malzemeye herhangi bir kuvvet uygulandığında, gerilme ve deformasyon arasındaki doğru orantı belirli bir noktaya kadar geçerlidir. Bu noktaya malzemenin elastikiyet sınırı denilmektedir. Şayet bu noktadan sonra kuvvet uygulanmasına devam edilirse, malzemedeki şekil değişmesi ve sonuç olarak kırılmasına neden olmaktadır. Yani ağaç malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldığında malzeme eski şekline ve hacmine dönmemektedir. Bu durumdaki deformasyon plastik deformasyona dönmüştür. Plastik deformasyondan sonra kuvvet uygulanmasına devam edilirse ağaç malzeme, bir noktada bu kuvvete dayanamayarak kırılır. Kırılma anında saptanan kuvvete en büyük kuvvet (maksimum yük) denir [8], [80].

Ağaç malzemenin EEM'si büyüdükçe, malzemenin sertliği artmakta ve elastikiyetlik derecesi azalmaktadır. Yani birim kuvvet altındaki deformasyon daha az olmakta, fakat elastikiyet sınırına daha erken varılmaktadır. Ayrıca EEM ağaç malzemenin esasını oluşturan liflerin yönüne göre değişmekte ve liflere paralel yönde daha büyük, liflere dik yönde ise daha küçük değerler almaktadır [8], [80].

Çalışmanın bu bölümünde en yüksek elastikiyet modülü değerini veren kriyojenik işlem sıcaklığı ve rutubet miktarı parametrelerini belirlemek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu doğrultuda EEM değerleri için Taguchi optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve optimum EEM değerini veren RM ve Kİ sıcaklık parametreleri belirlenmiştir. Çalışmaya esas Taguchi L₉ deney tasarımına göre oluşturulan faktör kombinasyonları için elde edilen EEM değerleri ile hesaplanan S/G oranları Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Eğilmeye elastikiyet modülü için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.

Deney Numarası	Değişkenler	Kİ (°C) (A)	RM (B)	EEM (N/mm ²)	EEM-S/G Oranı (dB)
1	A1B1	-140	HK	11869	81,4879
2	A1B2	-140	LD	10849	80,7076
3	A1B3	-140	SD	10242	80,2075
4	A2B1	-100	HK	11837	81,4646
5	A2B2	-100	LD	11150	80,9451
6	A2B3	-100	SD	10115	80,0989
7	A3B1	-40	HK	10740	80,6203
8	A3B2	-40	LD	10432	80,3669
9	A3B3	-40	SD	9530	79,5814

Çizelge 7.7’den görüldüğü üzere, en yüksek EEM değeri HK rutubet miktarında sahip -140 °C’de kriyojenik işlem gören örneklerde (11869 N/mm²), en düşük EEM değeri ise -40 °C’de kriyojenik işlem gören SD rutubet miktarına sahip örneklerde görülmüştür (9530 N/mm²). Gerçekleştirilen 9 deney sonucunda EEM-S/G oranlarının ortalaması 80,609 dB olarak belirlenmiştir.

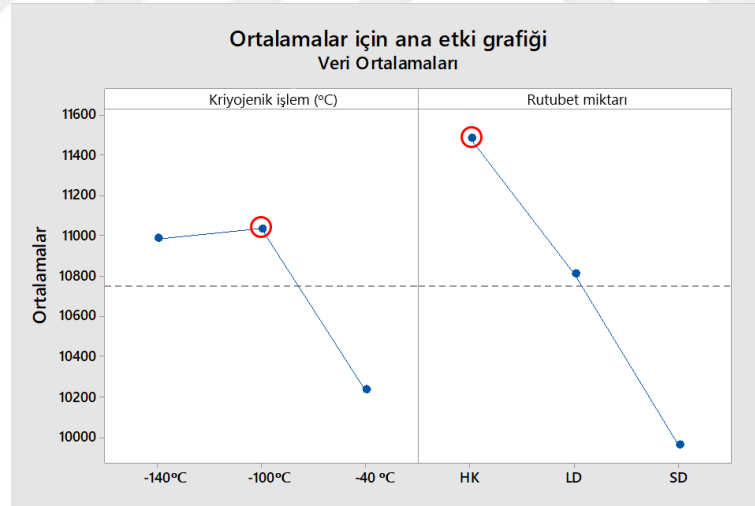
Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ve performans karakteristiği (EEM) üzerinde bu faktörler arasından en etkili olanın belirlenmesinde Taguchi yöntemiyle oluşturulan S/G yanıt tablosu kullanılmaktadır. Bu tablodaki en büyük S/G değerleri, o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi göstermektedir. EEM üzerinde her bir kontrol faktörünün etkisini gösteren S/G yanıt tablosu Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Çizelge 7.8. EEM için S/G yanıt tablosu.

Seviyeler	Kİ	RM
Seviye 1	80,80	81,19
Seviye 2	80,84	80,67
Seviye 3	80,19	79,96
Delta	0,65	1,23
Sıralama	2	1

Çizelge 7.8 incelendiğinde ahşap malzemenin EEM üzerinde kontrol faktörlerinden RM'nin, Kİ'ye göre eğilmede elastikiyet modülü değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yapılan varyans analizi ile doğrulanmış ve her bir faktörün sonuç değer üzerindeki katkı düzeyleri belirlenmiştir. Bununla birlikte Sarıçam örneklerin EEM değerinin optimum olduğu faktör seviyeleri RM için birinci seviye (HK), Kİ sıcaklığı için ise ikinci seviye (-100 °C) olarak belirlenmiştir.

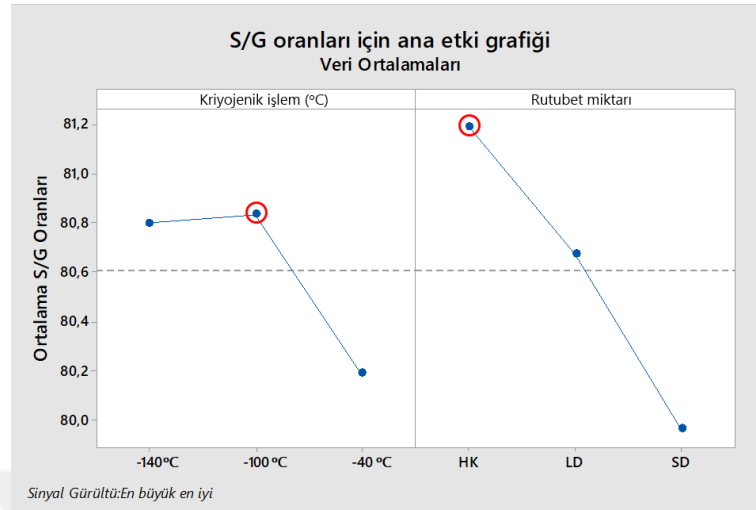
Kontrol faktörlerinin EEM'ye göre optimum değerlerini gösteren ortalamalar için ana etki grafiği Şekil 7.4'de, S/G oranları için ana etki grafiği ise Şekil 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7.4. Ortalamalar için ana etki grafiği (EEM).

Malzemenin kullanım yerinde EEM değerinin olabildiğince yüksek olması arzu edilmektedir. Bu nedenle gerek ortalamalar için ana etki grafiğinde gerekse S/G oranları için ana etki grafiğinde en yüksek değere sahip kontrol faktörü değerini sağlayan faktör seviyeleri o parametreye ait optimum seviyeyi göstermektedir. Şekil 7.4 ve 7.5'den görüldüğü üzere EEM değeri için optimum işlem parametrelerinin Kİ faktörü için ikinci

seveyede (-100 °C) ve RM faktörü için ise faktörün birinci seviyesi olan HK rutubet miktarında elde edildiği görülmektedir (A2B1).

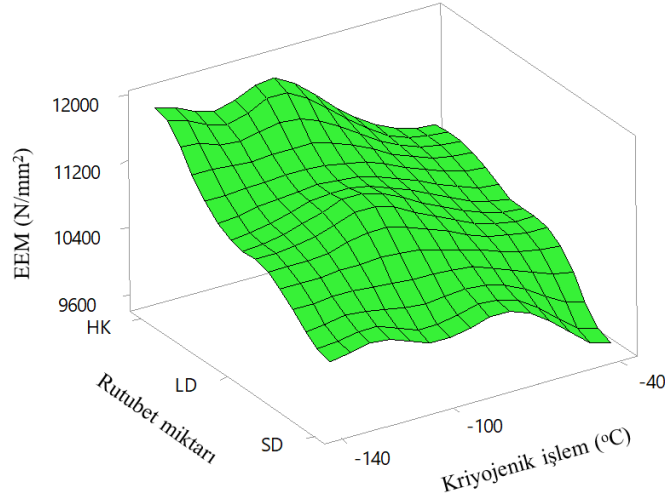


Şekil 7.5. S/G oranları için ana etki grafiği (EEM).

Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’de görüldüğü üzere farklı RM ve Kİ sıcaklıklarına maruz bırakılmak suretiyle modifiye edilen Sarıçam örnekler için Kİ sıcaklığı düştükçe ve RM azaldıkça EEM değerinin artış gösterdiği görülmektedir. Bu sonuçlar ahşap malzemede rutubet miktarının eğilme direncinde olduğu gibi eğilmede elastikiyet modülünü de olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Ahşap malzeme RM’ye bağlı olarak EEM değerlerindeki değişim incelendiğinde RM arttıkça EEM’nin tedrici olarak azaldığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarından bağımsız olarak Rutubet miktarının EEM üzerindeki etkisi dikkate alındığında en yüksek ortalamanın (11492 N/mm²) HK rutubet miktarına sahip örnekler olduğu görülmektedir. Rutubet miktarından bağımsız olarak kriyojenik işlem sıcaklıklarının EEM üzerindeki etkisi dikkate alındığında ise en yüksek EEM ortalamasının (11034 N/mm²) -100 °C’de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak Sarıçam örnekler için optimum faktör seviyeleri - 100 °C’de kriyojenik işlem sıcaklığı ve HK rutubet miktarı (A2B1) olarak belirlenmiştir.

7.2.1. Eğilmede Elastikiyet Modülü İçin Deneysel Sonuçların Yorumlanması

Sarıçam örneklere L₉ (3²) ortogonal dizisine göre uygulanan deneyler sonucu kontrol faktörlerine bağlı olarak EEM değerleri belirlenmiştir. Kullanılan Kİ ve RM’ye göre eğilmede elastikiyet modülü değerlerindeki değişimler Şekil 7.6’da verilmiştir.



Şekil 7.6. Kİ ve RM'nin EEM üzerindeki etkisi.

Şekil 7.6'dan anlaşılacağı üzere genel olarak ahşap malzeme EEM değerlerinin yaklaşık olarak 9500 N/mm^2 ile 11900 N/mm^2 arasında değiştiği görülmektedir. Tüm örnekler göz önünde bulundurulduğunda EEM değerlerinin RM ve Kİ sıcaklığı arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu değişim RM'ye bağlı olarak belirgin bir şekilde azalırken Kİ'ye bağlı olarak görece daha az etkilendiği görülmektedir. Şekil 7.6'dan görüldüğü üzere en yüksek EEM değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde, en düşük EEM değeri ise SD örneklerde görülmüştür. Bu durum rutubet miktarındaki artışın eğilimde elastikiyet modülünü olumsuz etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde uygulanan Kİ'ye bağlı olarak EEM değerlendirildiğinde Kİ sıcaklıkları pozitif sıcaklıklara yaklaştıkça EEM değerlerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 7.6'da kriyojenik işleme göre EEM değerlerindeki değişim incelendiğinde, en yüksek EEM değerinin $-140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de Kİ'ye maruz kalan örneklerde görülürken en düşük EEM değerinin $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de Kİ'ye maruz kalan örneklerde ortaya çıktığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarına bağlı olarak, $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sıcaklık düştüğünde %8'lik bir iyileşme olduğu, $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sıcaklık düştüğünde ise EEM değerinde anlamlı bir değişimin olmadığı görülmektedir. Bu durum sığ kriyojenik işlemin derin kriyojenik işleme göre EEM değeri üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak ahşap malzeme rutubet miktarından bağımsız olarak kriyojenik işlem uygulamasının malzemenin EEM üzerinde olumlu bir etki sağladığını göstermektedir. Uygulanan kriyojenik işlem sıcaklığından bağımsız olarak ahşap malzemenin rutubet miktarına bağlı EEM değerleri incelendiğinde ise tüm örneklerde en düşük EEM değerleri SD rutubet miktarına sahip örneklerde ölçüldüğü görülmüştür. Rutubet miktarına bağlı EEM değerlerindeki değişim HK rutubet miktarı ile LD rutubet miktarı arasında yaklaşık %6 iken LD rutubet miktarı ile SD

rutubet miktarına sahip örneklerdeki değişim yaklaşık %9 oranında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar LD rutubet noktasının üzerinde rutubet miktarına sahip olunmasının malzemenin mekanik özellikleri üzerinde daha az değişime sebep olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Bu durum literatürdeki çalışmalar ile uyumludur. Ahşap malzemenin RM'ye bağlı olarak mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimi ele alan çok sayıda çalışmada artan RM'nin ağaç malzeme mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Gerhards (1982), Ağaç malzeme RM %12'den %6 oranına düştüğünde liflere dik elastikiyet modülü değeri %20, liflere paralel elastikiyet modülü değeri ise değeri %9 oranında artarken, RM %20 oranına arttığında ise, liflere paralel elastikiyet modülü değeri %13, liflere dik elastikiyet modülü değeri %23 oranında azaldığını ortaya koymaktadır [5].

Isıl işlem ile kriyojenik işlemin ahşap malzeme EEM değeri üzerine etkileri karşılaştırıldığında, daha öncede bahsedildiği üzere ısıl işlemin ahşap malzemede direnç kayıplarına yol açtığı, bu kaybın kütle kaybı ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Bu kütle kaybı ahşap malzeme mekanik özelliklerden EEM değerini olumsuz yönde etkilemektedir [81]. Yapılan literatür taramasında Özçifçi ve arkadaşları (2009), ısıl işlemin ağaç malzeme teknolojik özellikleri üzerine etkilerini araştıran çalışmasında Sarıçam örneklerinin artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak kontrol grupları ile ısıl işleme maruz kalmış numunelerin kıyaslanması sonucunda, EEM değerinde %0,1 ile %12,4 arasında kayıplara neden olduğu belirtilmiştir [81]. Kriyojenik işlemin ağaç malzeme EEM üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile kriyojenik işleme maruz bırakılan EEM numune değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde -140 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %6, LD örneklerde %13,9 ve SD örneklerde ise %7 oranında bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. -100 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %5,7, LD örneklerde %17 ve SD örneklerde ise %5,7 oranında bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. Son olarak -40 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %4, oranında düşüş olduğu LD örneklerde %9,5 oranında iyileşme olduğu ve SD örneklerde ise kayda değer bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. Literatürden de görüldüğü üzere pozitif yüksek sıcaklıklarla ahşap malzemenin modifikasyonu olan ısıl işlem sonucu ağaç malzemenin EEM özelliklerinde yaklaşık %0,1 ile %12,4 oranında azalırken kriyojenik işlem sıcaklığına maruz bırakılan HK rutubet miktarına sahip malzemede tam tersine yaklaşık %6 ila %14 arasında değişen iyileştirmeler olduğu görülmüştür.

7.2.2. Eğilmede Elastikiyet Modülü İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Kontrol faktörlü olan kriyojenik işlem ve RM değerinin EEM üzerindeki etkilerini tespit etmek amacıyla yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları Çizelge 7.9’da verilmiştir. Bu analiz %95 güvenirlilik ve %5 önem seviyelerinde değerlendirilmiştir.

Çizelge 7.9. EEM için S/G oranı için ANOVA sonuçları.

Kontrol faktörü	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F değeri	P değeri (P<0,05)	Katkı oranı (%)
Kriyojenik işlem	2	1208348	604174	14,59	0,015*	24,89
Rutubet miktarı	2	3480723	1740361	42,02	0,002*	71,70
Hata	4	165672	41418			3,41
Toplam	8	4854742				100,00

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

Çizelge 7.9’da her bir değişkenin önem seviyesini gösteren F değerleri ve yüzde etki oranları görülmektedir. Çizelgeden görüldüğü üzere F değeri en yüksek olan kontrol faktörü, performans karakteristiğine en fazla etki eden faktördür. EEM değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre EEM üzerinde en etkili parametrenin %71,70 oranıyla RM olduğu ve Kİ’nin ise %24,89 oranında etkiye sahip olduğu görülmüştür. Örneklerin uygulanan Kİ ve RM faktörlerinin EEM değeri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olduğu görülmüştür ($P \leq 0,05$).

7.2.3. Eğilmede Elastikiyet Modülü İçin Regresyon Analizi

Regresyon modelinde daha öncede belirtilen prensipler dikkate alındığında EEM bağımlı değişken olarak etkilenen değişken olup, bağımsız değişkenler ise; Kriyojenik işlem sıcaklıkları (-140 °C, -100 °C, -40 °C) ve rutubet miktarları (HK, LD, SD) etkileyen değişkenlerdir. Bu bağlamda, yapılan çalışmada eğilmede elastikiyet modülü, Kİ ve RM arasındaki etkileşimden faydalanarak, regresyon analizi ile elde edilen ikinci dereceden matematiksel model aşağıda sunulmuştur.

$$EEM = 10346 - 33,6 KI - 408 RM - 0,1451 KI * KI - 88 RM * RM \quad (7.6)$$

$$R^2 = \%96,59$$

Eşitlik 7.6’da ikinci dereceden quadratik regresyon denklemi elde edilmiştir. R^2 regresyon

denkleminin belirlilik katsayısını ifade etmektedir. Bu değer bağımlı ve bağımsız değerler arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ifade etmektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel çalışmada bağımlı değişken olan eğilmede elastikiyet modülünün belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülerek göz önünde bulundurulmuş bağımsız değişkenlerin (Kİ ve RM) doğru tahmin edildiği ve EEM'deki değişimi yaklaşık %96 oranında açıkladığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, regresyon modeli ile yapılan çalışmada iyi bir öngörüle bulunulduğu ve %95 güvenilirlik düzeyinde bu regresyon denklemi kullanılarak EEM değerlerinin ilgili faktör seviyelerine göre tahmin edilebileceği söylenebilir.

7.2.4. Doğrulama Deneyleri ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması

Taguchi yönteminin son işlem basamağı olarak 3 adet doğrulama deneyi belirlenen optimum faktör seviyelerine göre (A2B1) gerçekleştirilmiştir. Bu durumda optimum deneysel parametrelerin bireysel etkileri göz önünde bulundurularak A2B1 için maksimum EEM tahmin değeri (EEM_t) aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır. Bu değerlerin hesaplanmasında Çizelge 7.8 (EEM için S/G yanıt tablosu) ve aşağıdaki denklemler kullanılarak S/G oranları gerçek değerlere dönüştürülmek suretiyle tahmin yapılmıştır [86].

$$\eta_g = A2 + B1 - \eta_{S/G} \quad (7.7)$$

$$EEM_t = 10^{\eta_g/20} \quad (7.8)$$

Eşitlik 7.7'de A2 ve B1 faktörlerin optimum seviyelerine ait S/G oranlarıdır. $\eta_{S/G}$, bütün faktörlerin S/G oranlarının ortalamasıdır. Eşitlik 7.8'de η_g , optimum seviyeler için hesaplanan S/G oranıdır. Bu değerler dikkate alındığında optimum seviyeler için tahmin $EEM_t = 11777,42 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin geçerliliği için güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı EEM_t değeri için maksimum ve minimum sınırlarını belirleyen bir değerdir. CI'nın hesaplanmasında Eşitlik 7.9 ve 7.10 kullanılmıştır.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,ve} \times V_{ep} \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (7.9)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (7.10)$$

Eşitlik 7.9 'da $F_{\alpha,1,V_e}$ önem düzeyi α 'nın F oranı, α önem düzeyi (%95), V_e hatanın serbestlik derecesi, V_{ep} hatanın varyansı, r doğrulama deney sayısı ve n_{eff} etkin ölçülen sonuçların sayısıdır. Eşitlik 7.10'da $N = 9$ toplam deney sayısını, $V_t = 4$ Çizelge 7.9 dikkate alınarak deney parametrelerine ait toplam serbestlik derecesini ifade etmektedir [86]. Buna göre $n_{eff} = 1,8$ olarak bulunmuştur. EEM için %95 güven aralığında yapılan değerlendirmede $V_e = 4$ dikkate alınarak $F_{\alpha,1,V_e} = 7,71$ olarak bulunmuş ve $V_{ep} = 41418$ olarak Çizelge 7.9'dan okunmuştur. Bu çalışmada optimum parametreler kullanılarak 3 doğrulama deneyi yapılmıştır. Dolayısı ile Eşitlik 7.9 ve 7.10 kullanılarak $CI = 530,106$ olarak hesaplanmıştır. EEM için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu %95 güven aralığı dikkate alınarak $(11777,42 \text{ N/mm}^2) \pm 530,106$ ya da $(11247,32 \text{ ile } 12307,53 \text{ N/mm}^2)$ arası beklenmektedir. Optimum faktör seviyeleri dikkate alınarak yürütülen 3 adet doğrulama deneylerinde EEM değerleri sırasıyla 12248, 11882 ve 12747 N/mm^2 olarak elde edilmiş ve bunların ortalaması $12292,33 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplanmış, doğrulama deneyleri ortalaması belirlenen güven düzeyinde $(11247,32 < 12292,33 < 12307,53 \text{ N/mm}^2)$ gerçekleşmiştir. Çizelge 7.10'da Taguchi metodu ile elde edilen tahmin değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tahmin değerler ile gerçek deneysel sonuçların hata oranı kabul edilebilir sınırı olan %20'den düşük olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.10. EEM için Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Faktör Seviyeleri	EEM Deneysel	EEM _t (N/mm ²)	Hata (%)
A2B1 (Optimum)	12292,33	11772,42	4,23
A2B2 (Rastgele)	12065	11093	8,05

Çizelge 7.10'dan görüldüğü üzere tahmin hatası oldukça küçük çıkmış olup (< %20) eğilimde elastikiyet modülü deneylerine Taguchi metodu başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

7.3. LİFLERE PARALEL KESME DİRENCİ DENEYSEL OPTİMİZASYONU

Ahşap malzemenin iki bitişik kesitini birbirinden ayırmak için ters yönlerde etki eden ve aynı düzlem içerisinde olmak şartıyla lifleri birbirinden ayırmaya çalışan kuvvetlere karşı

gösterdiği dirence makaslama (kesme) direnci denir. Genellikle bütün ahşap malzemelerde özgül ağırlığın artmasına paralel olarak makaslama direncinde de artış görülmektedir [8], [80]. Makaslama dayanımı üzerinde yoğunluk, rutubet, lif yönü ve ahşap malzemedeki kusurlar etkilidir [74].

Makaslama dayanımı, ahşabın yapı malzemesi olarak kullanılmasında ve özellikle birleşme bölgelerinde oldukça büyük önem arz etmektedir. Ahşap malzemeye uygulanan kuvvetler bakımından, liflere dik doğrultuda uygulanan basınç kuvvetlerine karşı dayanımı, lifler paralel doğrultuda uygulanan kuvvetlere karşı gösterilen dayanımdan daha fazla olduğu bilinmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde en yüksek kesme direnci değerini veren kriyojenik işlem sıcaklığı ve rutubet miktarı parametrelerini belirlemek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu doğrultuda KD değerleri için Taguchi optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve optimum KD değerini veren RM ve Kİ parametreleri belirlenmiştir. Çalışmaya esas Taguchi L₉ deney tasarımına göre oluşturulan faktör kombinasyonları için elde edilen KD değerleri ile hesaplanan S/G oranları Çizelge 7.11’de verilmiştir.

Çizelge 7.11. Kesme direnci için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.

Deney Numarası	Değişkenler	Kİ (°C) (A)	RM (B)	KD (N/mm ²)	KD-S/G Oranı (dB)
1	A1B1	-140	HK	12,183	21,7153
2	A1B2	-140	LD	11,279	21,0458
3	A1B3	-140	SD	10,79	20,6604
4	A2B1	-100	HK	12,503	21,9406
5	A2B2	-100	LD	11,468	21,1899
6	A2B3	-100	SD	10,415	20,3530
7	A3B1	-40	HK	11,954	21,5499
8	A3B2	-40	LD	11,329	21,0840
9	A3B3	-40	SD	11,654	21,3297

Çizelge 7.11’den görüldüğü üzere, en yüksek KD değeri HK rutubet miktarında-100 - 100 °C’de kriyojenik işlem gören örneklerde (12,503 N/mm²), en düşük KD değeri ise -100 °C’de kriyojenik işlem gören SD rutubet miktarına sahip örneklerde görülmüştür (10,415N/mm²). Gerçekleştirilen 9 deney sonucunda KD-S/G oranlarının ortalaması

21,208 dB olarak belirlenmiştir.

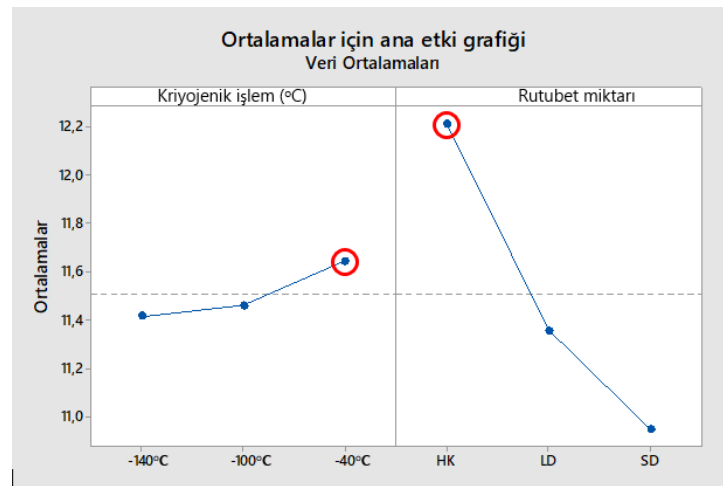
Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ve performans karakteristiği (KD) üzerinde bu faktörler arasından en etkili olanın belirlenmesinde Taguchi metoduyla oluşturulan S/G yanıt tablosu kullanılmaktadır. Bu tablodaki en büyük S/G değerleri, o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi göstermektedir. KD üzerinde her bir kontrol faktörünün etkisini gösteren S/G yanıt tablosu Çizelge 7.12’de verilmiştir.

Çizelge 7.12. KD için S/G yanıt tablosu.

Seviyeler	Kİ	RM
Seviye 1	21,14	21,74
Seviye 2	21,16	21,11
Seviye 3	21,32	20,78
Delta	0,18	0,95
Sıralama	2	1

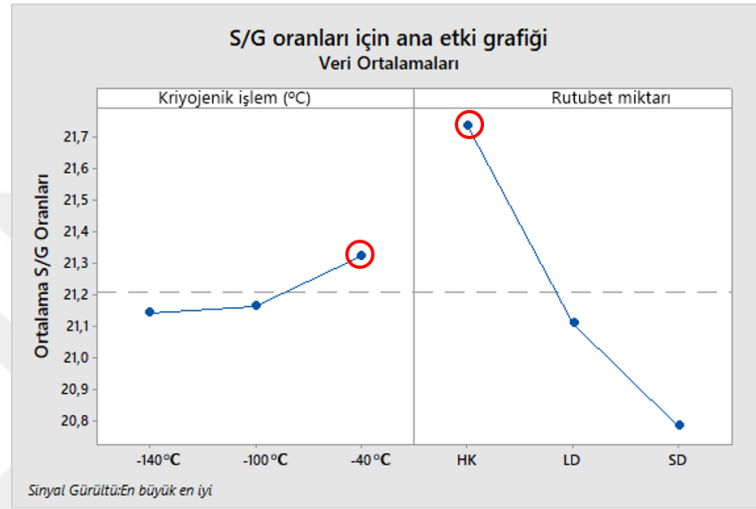
Çizelge 7.12 incelendiğinde ahşap malzemenin KD üzerinde kontrol faktörlerinden RM’nin, Kİ sıcaklığına göre KD değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yapılan varyans analizi ile doğrulanmış ve her bir faktörün sonuç değer üzerindeki katkı düzeyleri belirlenmiştir. Bununla birlikte Sarıçam örneklerin KD değerinin optimum olduğu faktör seviyeleri RM için birinci seviye (HK), Kİ sıcaklığı için ise üçüncü seviye (-40 °C) olarak belirlenmiştir.

Kontrol faktörlerinin KD’ye göre optimum değerlerini gösteren ortalamalar için ana etki grafiği Şekil 7.7’de S/G oranları için ana etki grafiği ise Şekil 7.8’de verilmiştir.



Şekil 7.7. Ortalamalar için ana etki grafiği (KD).

Malzemenin kullanım yerinde KD değerinin olabildiğince yüksek olması arzu edilmektedir. Bu nedenle gerek ortalamalar için ana etki grafiğinde gerekse S/G oranları için ana etki grafiğinde en yüksek değere sahip kontrol faktörü değerini sağlayan faktör seviyeleri o parametreye ait optimum seviyeyi göstermektedir. Şekil 7.7 ve 7.8'den görüldüğü üzere KD değeri için optimum işlem parametrelerinin Kİ faktörü için üçüncü seviyede (-40 °C) ve RM faktörü için ise faktörün birinci seviyesi olan HK rutubet miktarında elde edildiği görülmektedir (A3B1).



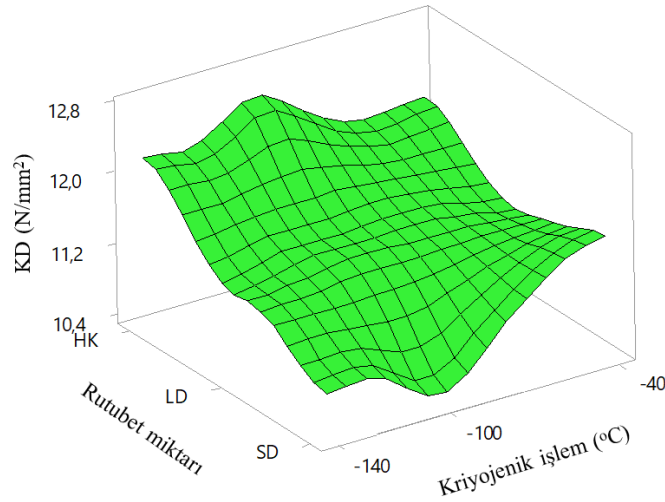
Şekil 7.8. S/G oranları için ana etki grafiği (KD).

Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de görüldüğü üzere farklı RM ve Kİ sıcaklığına maruz bırakılmak suretiyle modifiye edilen Sarıçam örnekler için Kİ sıcaklığı yükseldikçe ve RM azaldıkça kesme direnci değerinin artış gösterdiği görülmektedir. Ahşap malzeme RM'sine bağlı olarak KD değerlerindeki değişim incelendiğinde RM arttıkça KD'nin tedrici olarak azaldığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarından bağımsız olarak Rutubet miktarının KD üzerindeki etkisi dikkate alındığında en yüksek ortalamanın (12,21 N/mm²) HK rutubet miktarına sahip örnekler olduğu görülmektedir. Rutubet miktarından bağımsız olarak kriyojenik işlem sıcaklıklarının KD üzerindeki etkisi dikkate alındığında ise en yüksek KD ortalamasının (11,645 N/mm²) -40 °C'de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak Sarıçam örnekler için optimum faktör seviyeleri -40 °C'de kriyojenik işlem sıcaklığı ve HK rutubet miktarı (A3B1) olarak belirlenmiştir.

7.3.1. Kesme Direnci İçin Deneysel Sonuçların Yorumlanması

Sarıçam örnekler L₉ (3²) ortogonal dizisine göre uygulanan deneyler sonucu kontrol faktörlerine bağlı olarak kesme direnci değerleri belirlenmiştir. Kullanılan Kİ ve RM'ye

göre KD değerlerindeki değişimler Şekil 7.9’da verilmiştir.



Şekil 7.9. Kİ ve RM'nin KD üzerindeki etkisi.

Şekil 7.9'dan anlaşılacağı üzere genel olarak ahşap malzeme KD değerlerinin yaklaşık olarak 10,4 N/mm² ile 12,6 N/mm² arasında değiştiği görülmektedir. Tüm örnekler göz önünde bulundurulduğunda KD değerlerinin RM arttıkça azalma eğiliminde olduğu Kİ sıcaklıklarının pozitif sıcaklıklara yaklaştıkça KD değerlerinin görece arttığı görülmektedir. Bu değişim RM'ye bağlı olarak belirgin bir şekilde azalırken Kİ sıcaklığına bağlı olarak görece daha az etkilendiği görülmektedir. Şekil 7.9'dan görüldüğü üzere en yüksek KD değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde, en düşük değeri ise SD örneklerde görülmüştür. Bu durum rutubet miktarındaki artışın kesme direncini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde uygulanan Kİ'ye bağlı olarak KD değerlendirildiğinde Kİ sıcaklıkları pozitif sıcaklıklara yaklaştıkça KD değerlerinin arttığı görülmektedir. Şekil 7.9'dan Kİ'ye göre KD değerlerindeki değişim incelendiğinde, en yüksek KD değerinin -100 °C'de Kİ'ye maruz kalan örneklerde görülürken en düşük KD değerinin ise yine -100 °C'de Kİ'ye maruz kalan örneklerde ortaya çıktığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarına bağlı olarak, -40 °C'den -100 °C'ye sıcaklık düştüğünde %1'lik bir kayıp olduğu, -100 °C'den -140 °C'ye sıcaklık düştüğünde ise KD değerinde anlamlı bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. Bu durum kriyojenik işlemin KD değeri üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığını göstermektedir. Sonuç olarak ahşap malzeme rutubet miktarından bağımsız olarak kriyojenik işlem uygulamasının malzemenin KD üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Uygulanan kriyojenik işlem sıcaklığından bağımsız olarak ahşap malzemenin rutubet miktarına bağlı KD değerleri incelendiğinde ise tüm örneklerde en düşük KD değerleri

SD rutubet miktarına sahip örneklerde ölçüldüğü görülmüştür. Rutubet miktarına bağlı KD değerlerindeki değişim HK rutubet miktarı ile LD rutubet miktarı arasında yaklaşık %8 iken LD rutubet miktarı ile SD rutubet miktarına sahip örneklerdeki değişim yaklaşık %4 oranında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar LD rutubet noktasının üzerinde rutubet miktarına sahip olunmasının malzemenin mekanik özellikleri üzerinde daha az değişime sebep olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Bu durum literatürdeki çalışmalar ile uyumludur. Ahşap malzemenin RM'ye bağlı olarak mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimi ele alan çok sayıda çalışmada artan RM'nin ağaç malzeme mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Gerhards (1982), Ağaç malzeme RM %12'den %6 oranına düştüğünde KD değeri %20 oranında artarken RM %20 oranına çıktığında %20 azaldığını ortaya koymaktadır [5].

Isıl işlem ile kriyojenik işlemin ahşap malzeme KD değeri üzerine etkileri karşılaştırıldığında, daha öncede bahsedildiği üzere ısıl işlemin ahşap malzemedeki direnç kayıplarına yol açtığı, bu kaybın kütle kaybı ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Bu kütle kaybı ahşap malzeme mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir [82]. Yapılan literatür taramasında Ulutay ve arkadaşları (2014) Türkiye'de ısıl işlemin ağaç malzeme üzerine etkisi konusunda yaptıkları araştırmalarında ısıl işlemin ahşap malzeme mekanik özelliklerden KD'yi artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak azalttığı belirtilmiştir [37]. Kriyojenik işlemin ağaç malzeme KD değeri üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile kriyojenik işleme maruz bırakılan KD numune değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde -140 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %6,7 oranında bir iyileşme olduğu, LD örneklerde %5,6 oranında düşüş olduğu ve SD örneklerde kayda değer bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. -100 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %9,8 iyileşme olduğu ve LD örneklerde %4,1, SD örneklerde ise %2,8 oranında bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Son olarak -40 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %4,7, SD örneklerde %8,7 oranında iyileşme olduğu ve LD örneklerde ise %5,2 oranında düşüş olduğu ve gözlenmiştir. Literatürden de görüldüğü üzere pozitif yüksek sıcaklıklarla ahşap malzemenin modifikasyonu olan ısıl işlem KD'nin mekanik özelliklerinde kayıplar yaşandığını, kriyojenik işlem sıcaklığına maruz bırakılan HK rutubet düzeyine sahip örneklerde tam tersine yaklaşık %5 ila %10 arasında değişen iyileştirmeler olduğu görülmüştür.

7.3.2. Kesme Direnci İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Kontrol faktörlü olan kriyojenik işlem ve RM değerinin KD üzerindeki etkilerini tespit etmek için yapılan ANOVA sonuçları Çizelge 7.13’de verilmiştir. Bu analiz %95 güvenilirlik ve %5 önem seviyelerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.13. KD için S/G oranı için ANOVA sonuçları.

Kontrol faktörü	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F değeri	P değeri (P<0,05)	Katkı oranı (%)
Kriyojenik işlem	2	0,08768	0,04384	0,20	0,829*	2,53
Rutubet miktarı	2	2,48351	1,24176	5,57	0,070*	71,71
Hata	4	0,89211	0,22303			25,76
Toplam	8	3,46330				100,00

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

Çizelge 7.13’de görüldüğü üzere her bir değişkenin önem seviyesini gösteren F değerleri ve yüzde etki oranları görülmektedir. Çizelgede belirtildiği üzere F değeri en yüksek olan kontrol faktörü, performans karakteristiğine en fazla etki eden faktördür. KD değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre KD üzerinde en etkili parametrenin %71,71 oranıyla RM olduğu ve Kİ’nin ise %2,53 gibi bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Örneklerin KD üzerinde Kİ ve RM faktörleri istatistiksel olarak anlamsız bir etken olduğu görülmüştür ($P > 0,05$).

7.3.3. Kesme Direnci İçin Regresyon Analizi

Regresyon modelinde daha öncede belirtildiği üzere prensipler dikkate alındığında KD bağımlı değişken olarak etkilenen değişken olup, bağımsız değişkenler ise; Kriyojenik işlem sıcaklıkları (-140 °C, -100 °C, -40 °C) ve rutubet miktarları (HK, LD, SD) etkileyen değişkenlerdir. Bu bağlamda, yapılan çalışmada liflere paralel kesme direnci, Kİ ve RM arasındaki etkileşimden faydalanarak, regresyon analizi ile elde edilen ikinci dereceden matematiksel model aşağıda sunulmuştur.

$$KD = 13,85 + 0,0058 KI - 1,53 RM + 0,000019 KI*KI + 0,224 RM*RM \quad (7.11)$$

$$R^2 = \%74,24$$

Eşitlik 7.11.’de ikinci dereceden quadratik regresyon denklemi elde edilmiştir. R^2

regresyon denkleminin belirlilik katsayısını ifade etmektedir. Bu değer bağımlı ve bağımsız değerler arasında orta seviyeli bir ilişki olduğunu ifade etmektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel çalışmada bağımlı değişken olan KD'nin oluşma oranında orta seviyeli etkiye sahip olduğu düşünülerek seçilen bağımsız faktörlerin (Kİ ve RM) doğru tahmin edildiği KD'deki değişimi yaklaşık %74 oranında açıkladığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, regresyon modeli ile de yapılan çalışmada kabul edilebilir öngörülebilir bulunulduğu ve çalışmanın realiteler ile paralel olduğu sonucuna varılmaktadır.

7.3.4. Doğrulama Deneyle ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması

Taguchi yönteminin son işlem basamağı olarak 3 adet doğrulama deneyi belirlenen optimum faktör seviyelerine göre (A3B1) gerçekleştirilmiştir. Bu durumda optimum deneysel parametrelerin bireysel etkileri göz önünde bulundurularak A3B1 için maksimum KD tahmin değeri (KD_t) aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır. Bu değerlerin hesaplanmasında Çizelge 7.12 (KD için S/G yanıt tablosu) ve aşağıdaki eşitlikler kullanılarak S/G oranları gerçek değerlere dönüştürülmek suretiyle tahmin yapılmıştır [86].

$$\eta_g = A3 + B1 - \eta_{S/G} \quad (7.12)$$

$$KD_t = 10^{\eta_g/20} \quad (7.13)$$

Eşitlik 7.12'de A3 ve B1 faktörlerin optimum seviyelerine ait S/G oranlarıdır. $\eta_{S/G}$, bütün faktörlerin S/G oranlarının ortalamasıdır. Eşitlik 7.13'de η_g , optimum seviyeler için hesaplanan S/G oranıdır. Bu değerler dikkate alındığında optimum seviyeler için tahmin $KD_t = 12,37 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin geçerliliği için güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı KD_t değeri için maksimum ve minimum sınırlarını belirleyen bir değerdir. CI'nın hesaplanmasında Eşitlik 7.14 ve 7.15 kullanılmıştır.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,Ve} \times V_{ep} \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (7.14)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (7.15)$$

Eşitlik 7.14'de $F_{\alpha,1,Ve}$ önem düzeyi α 'nın F oranı, α önem düzeyi (%95), Ve hatanın serbestlik derecesi, V_{ep} hatanın varyansı, r doğrulama deney sayısı ve n_{eff} etkin ölçülen

sonuçların sayısıdır. Eşitlik 7.15’de $N = 9$ toplam deney sayısını, $V_t = 4$ Çizelge 7.13 dikkate alınarak deney parametrelerine ait toplam serbestlik derecesini ifade etmektedir [86]. Buna göre $n_{eff} = 1,8$ olarak bulunmuştur. KD için %95 güven aralığında yapılan değerlendirmede $V_e = 4$ dikkate alınarak $F_{\alpha;1,V_e} = 7,71$ olarak bulunmuş ve $V_{ep} = 0,22303$ olarak Çizelge 7.13’den okunmuştur. Bu çalışmada optimum parametreler kullanılarak 3 doğrulama deneyi yapılmıştır. Dolayısı ile Eşitlik 7.14 ve 7.15 kullanılarak $CI = 1,23$ olarak hesaplanmıştır. KD için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu %95 güven aralığı dikkate alınarak $(12,37 \text{ N/mm}^2) \pm 1,23$ ya da $(11,14 \text{ ile } 13,6 \text{ N/mm}^2)$ arası beklenmektedir. Optimum faktör seviyeleri dikkate alınarak yürütülen 3 adet doğrulama deneylerinde KD değerleri sırasıyla 11,008, 12,069 ve 11,930 N/mm^2 olarak elde edilmiş ve bunların ortalaması $11,669 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplanmış, doğrulama deneyleri ortalaması belirlenen güven düzeyinde $(11,14 < 11,669 < 13,6 \text{ N/mm}^2)$ gerçekleşmiştir. Çizelge 7.14’de Taguchi metodu ile elde edilen tahmin değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tahmin değerler ile gerçek deneysel sonuçların hata oranı kabul edilebilir sınırı olan %20’den düşük olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.14. KD İçin Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Faktör Seviyeleri	KD Deneysel	KD _t (N/mm^2)	Hata (%)
A3B1 (Optimum)	11,669	12,37	5,66
A2B2 (Rastgele)	11,626	11,30	2,80

Çizelge 7.14’den görüldüğü üzere tahmin hatası küçük çıkmış olup ($< \%20$) kesme direnci deneylerine Taguchi metodu başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

7.4. LİFLERE PARALEL BASINÇ DİRENCİ DENEYSEL OPTİMİZASYONU

Basma direnci, ahşap malzemeyi ezmeye ve sıkıştırmaya karşı çalışan kuvvetlere karşı gösterdiği dirençtir. BD maden direkleri, çit kazıkları gibi dikine kullanılması istenilen yerlerde göstereceği direnç bakımından kullanım yerlerindeki davranış özellikleri ve maruz kalınan yükler altındaki dayanımlarının belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan temel bir ölçüttür [80].

Çalışmanın bu bölümünde en yüksek BD değerini veren kriyojenik işlem sıcaklığı ve

rutubet miktarı parametrelerini belirlemek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu doğrultuda BD değerleri için Taguchi optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve optimum basınç direnci değerini veren RM ve Kİ parametreleri belirlenmiştir. Çalışmaya esas Taguchi L₉ deney tasarımına göre oluşturulan faktör kombinasyonları için elde edilen BD değerleri ile hesaplanan S/G oranları 7.15’de verilmiştir.

Çizelge 7.15. Basınç direnci için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.

Deney Numarası	Değişkenler	Kİ (°C) (A)	RM (B)	BD (N/mm ²)	BD-S/G Oranı (dB)
1	A1B1	-140	HK	56,078	34,9758
2	A1B2	-140	LD	49,357	33,8670
3	A1B3	-140	SD	50,632	34,0886
4	A2B1	-100	HK	53,425	34,5549
5	A2B2	-100	LD	50,597	34,0825
6	A2B3	-100	SD	48,492	33,7135
7	A3B1	-40	HK	52,619	34,4228
8	A3B2	-40	LD	49,320	33,8604
9	A3B3	-40	SD	49,901	33,9622

Çizelge 7.15’de görüldüğü üzere, en yüksek BD değeri HK rutubet miktarında -140 °C’de kriyojenik işlem gören örneklerde (56,078 N/mm²), en düşük BD değeri ise -100 °C’de kriyojenik işlem gören SD rutubet miktarına sahip örneklerde görülmüştür (48,492 N/mm²). Gerçekleştirilen 9 deney sonucunda BD-S/G oranlarının ortalaması 34,170 dB olarak belirlenmiştir.

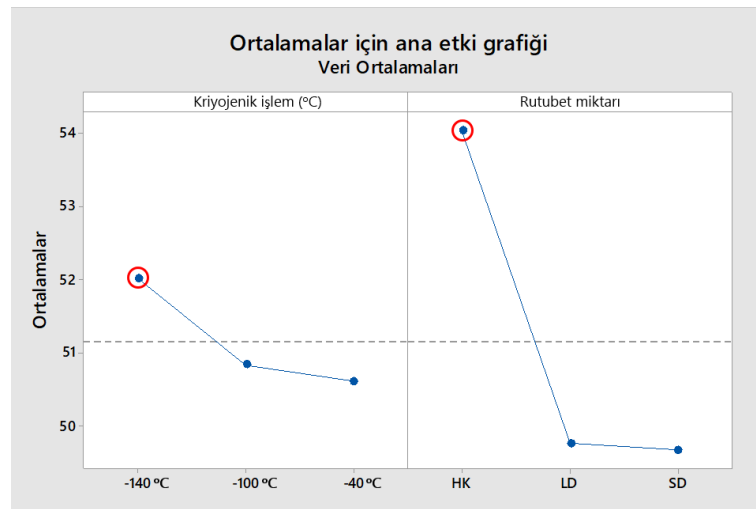
Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ve performans karakteristiği (BD) üzerinde bu faktörler arasından en etkili olanın belirlenmesinde Taguchi metoduyla oluşturulan S/G yanıt tablosu kullanılmaktadır. Bu tablodaki en büyük S/G değerleri, o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi göstermektedir. BD üzerinde her bir kontrol faktörünün etkisini gösteren S/G yanıt tablosu Çizelge 7.16’da verilmiştir.

Çizelge 7.16. BD için S/G yanıt tablosu.

Seviyeler	Kİ	RM
Seviye 1	34,31	34,65
Seviye 2	34,12	33,94
Seviye 3	34,08	33,92
Delta	0,23	0,73
Sıralama	2	1

Çizelge 7.16 incelendiğinde ahşap malzemenin BD üzerinde kontrol faktörlerinden RM'nin, Kİ sıcaklığına göre BD değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yapılan varyans analizi ile doğrulanmış ve her bir faktörün sonuç değer üzerindeki katkı düzeyleri belirlenmiştir. Bununla birlikte Sarıçam örneklerin BD değerinin optimum olduğu faktör seviyeleri RM ve Kİ sıcaklıklarının birinci seviyelerinde elde edilmiştir (RM = HK ve Kİ sıcaklığı = -140 °C).

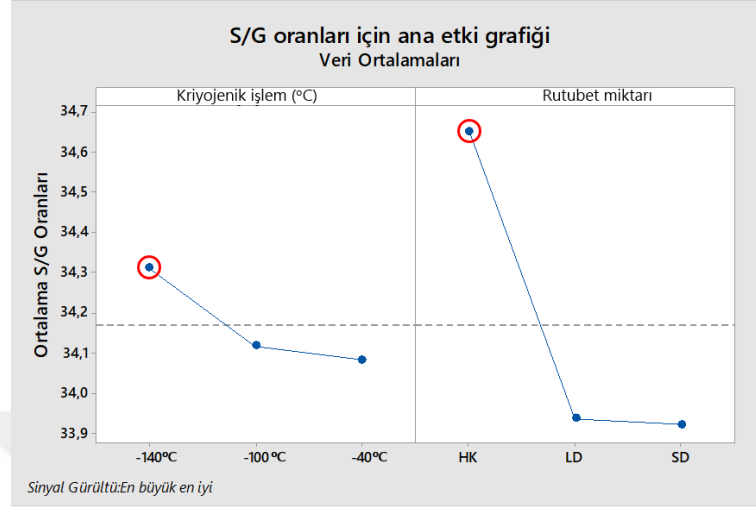
Kontrol faktörlerinin BD'ye göre optimum değerlerini gösteren ortalamalar için ana etki grafiği Şekil 7.10'da S/G oranları için ana etki grafiği ise Şekil 7.11'de verilmiştir.



Şekil 7.10. Ortalamalar için ana etki grafiği (BD).

Malzemenin kullanım yerinde BD değerinin olabildiğince yüksek olması arzu edilmektedir. Bu nedenle gerek ortalamalar için ana etki grafiğinde gerekse S/G oranları için ana etki grafiğinde en yüksek değere sahip kontrol faktörü değerini sağlayan faktör seviyeleri o parametreye ait optimum seviyeyi göstermektedir. Şekil 7.10 ve 7.11'den

görüldüğü üzere BD değeri için optimum işlem parametrelerinin her iki kontrol faktörünün de birinci seviyesi olan -140 °C Kİ sıcaklığı ve HK rutubet miktarında elde edildiği görülmektedir (A1B1).

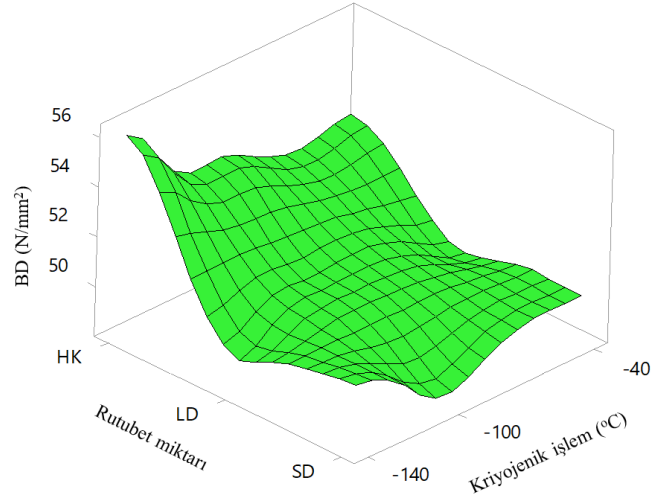


Şekil 7.11. S/G oranları için ana etki grafiği (BD).

Şekil 7.10 ve Şekil 7.11’de görüldüğü üzere farklı RM ve Kİ sıcaklığına maruz bırakılmak suretiyle modifiye edilen Sarıçam örnekler için Kİ sıcaklığı düştükçe ve RM azaldıkça basınç direnci değerinin artış gösterdiği görülmektedir. Ahşap malzeme RM’sine bağlı olarak BD değerlerindeki değişim incelendiğinde RM arttıkça diğer mekanik özelliklere benzer sonuçlar çıkardığı ve BD’nin tedrici olarak azaldığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarından bağımsız olarak Rutubet miktarının BD üzerindeki etkisi dikkate alındığında en yüksek ortalamasının (54,04 N/mm²) HK rutubet miktarına sahip örnekler olduğu görülmektedir. Rutubet miktarından bağımsız olarak kriyojenik işlem sıcaklıklarının BD üzerindeki etkisi dikkate alındığında ise en yüksek BD ortalamasının (52,02 N/mm²) -140 °C’de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak Sarıçam örnekler için optimum faktör seviyeleri -140 °C’de kriyojenik işlem sıcaklığı ve HK rutubet miktarı (A1B1) olarak belirlenmiştir.

7.4.1. Basınç Direnci İçin Deneysel Sonuçların Yorumlanması

Sarıçam örnekler L₉ (3²) ortogonal dizisine göre uygulanan deneyler sonucu kontrol faktörlerine bağlı olarak basınç direnci değerleri belirlenmiştir. Kullanılan Kİ ve RM’ye göre BD değerlerindeki değişimler Şekil 7.12’de verilmiştir.



Şekil 7.12. Kİ ve RM'nin BD üzerindeki etkisi.

Şekil 7.12'den anlaşılacağı üzere genel olarak ahşap malzeme BD değerlerinin yaklaşık olarak 48 N/mm^2 ile 56 N/mm^2 arasında değiştiği görülmektedir. Tüm örnekler göz önünde bulundurulduğunda BD değerlerinin RM ve Kİ sıcaklığı arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu değişim RM'ye bağlı olarak belirgin bir şekilde azalırken Kİ sıcaklığına bağlı olarak görece daha az etkilendiği görülmektedir. Şekil 7.12'den görüldüğü üzere en yüksek BD değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde, en düşük değeri ise SD örneklerde görülmüştür. Bu durum rutubet miktarındaki artışın basınç direncini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde uygulanan Kİ'ye bağlı olarak BD değerlendirildiğinde Kİ sıcaklıkları pozitif sıcaklıklara yaklaştıkça BD değerlerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 7.12'den Kİ'ye göre BD değerlerindeki değişim incelendiğinde, en yüksek BD değerinin $-140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de Kİ'ye maruz kalan örneklerde görülürken en düşük BD değerinin $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de Kİ'ye maruz kalan örneklerde ortaya çıktığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarına bağlı olarak, $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sıcaklık düştüğünde anlamlı bir değişikliğin olmadığı, $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sıcaklık düştüğünde ise BD değerinde %2'lik bir iyileşme olduğu görülmektedir. Bu durum derin kriyojenik işlemin sıg kriyojenik işleme göre BD değeri üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak ahşap malzeme rutubet miktarından bağımsız olarak kriyojenik işlem uygulamasının malzemenin BD üzerinde küçükte olsa olumlu bir etki sağladığını göstermektedir. Uygulanan kriyojenik işlem sıcaklığından bağımsız olarak ahşap malzemenin rutubet miktarına bağlı BD değerleri incelendiğinde ise tüm örneklerde en düşük BD değerleri SD rutubet miktarına sahip örneklerde ölçüldüğü görülmüştür. Rutubet miktarına bağlı BD değerlerindeki değişim HK rutubet miktarı ile

LD rutubet miktarı arasında yaklaşık %9 iken, LD rutubet miktarı ile SD rutubet miktarına ise anlamlı bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Bu sonuçlar LD rutubet noktasının üzerinde rutubet miktarına sahip olunmasının malzemenin mekanik özellikleri üzerinde daha az değişime sebep olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Bu durum literatürdeki çalışmalar ile uyumludur. Ahşap malzemenin RM'ye bağlı olarak mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimi ele alan çok sayıda çalışmada artan RM'nin ağaç malzeme mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Gerhards (1982), Ağaç malzeme RM %12'den %6 oranına düştüğünde BD değeri %35 oranında artarken RM %20 oranına arttığında %35 azaldığını ortaya koymaktadır [5].

Isıl işlem ile kriyojenik işlemin ahşap malzeme BD değeri üzerine etkileri karşılaştırıldığında, daha öncede bahsedildiği üzere ısıl işlemin ahşap malzemedeki direnç kayıplarına yol açtığı, bu kaybın kütle kaybı ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Bu kütle kaybı ahşap malzeme mekanik özelliklerden BD değerini olumsuz yönde etkilemektedir [82]. Yapılan literatür taramasında Doruk & Perçin (2010), ısıl işlemin ağaç malzeme mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştıran çalışmasında Sarıçam örneklerinin artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak kontrol grupları ile ısıl işleme maruz kalmış numunelerin kıyaslanması sonucunda, BD'nin 200 °C'de 10 saat ısıl işlem gören numunelerinde %20,51 oranında kayıplar yaşandığını belirtmiştir [82]. Kriyojenik işlemin ağaç malzeme BD üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile kriyojenik işleme maruz bırakılan BD numune değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde -140 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %12,8, LD örneklerde %4,6 ve SD örneklerde ise %2,5'lük bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. -100 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %7,5, LD örneklerde %7,2 oranında bir iyileşme olduğu ve SD örneklerde ise %1,8'lik bir kayıp olduğu gözlenmiştir. Son olarak -40 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %5,9, LD örneklerde %4,5 ve SD örneklerde ise %1 oranında bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. Literatürden de görüldüğü üzere pozitif yüksek sıcaklıklarla ahşap malzemenin modifikasyonu olan ısıl işlem BD'nin 200 °C'de 10 saat ısıl işlem gören numunelerinde %20,51 oranında kayıplar yaşandığını, kriyojenik işlem sıcaklığına maruz bırakılan malzemedeki tam tersine yaklaşık %1 ila %13 arasında değişen iyileştirmeler olduğu görülmüştür.

7.4.2. Basınç Direnci İçin Varyans Analizi(ANOVA)

Kontrol faktörlü olan kriyojenik işlem ve RM değerinin BD üzerindeki etkilerini tespit

etmek için yapılan ANOVA sonuçları Çizelge 7.17’te verilmiştir. Bu analiz %95 güvenilirlik ve %5 önem seviyelerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.17. BD için S/G oranı için ANOVA sonuçları.

Kontrol faktörü	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F oranı	P değeri (P<0,05)	Katkı oranı (%)
Kriyojenik işlem	2	3,439	1,720	1,05	0,429*	7,26
Rutubet miktarı	2	37,402	18,701	11,45	0,022*	78,95
Hata	4	6,533	1,633			13,79
Toplam	8	47,374				100,00

*: P ≤ 0,05: anlamlı, P > 0,05: anlamsız

Çizelge 7.17’den görüldüğü üzere her bir değişkenin önem seviyesini gösteren F değerleri ve yüzde etki oranları görülmektedir. Çizelgede belirtildiği üzere F değeri en yüksek olan kontrol faktörü, performans karakteristiğine en fazla etki eden faktördür. BD değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre BD üzerinde en etkili parametrenin %78,95 oranıyla RM olduğu ve Kİ’nin ise %7,26 gibi bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Örneklerin BD üzerinde Kİ faktörü istatistiksel olarak anlamsız (P > 0,05), RM faktörü ise istatistiksel olarak anlamlı bir etken olduğu görülmüştür (P ≤ 0,05).

7.4.3. Basınç Direnci İçin Regresyon Analizi

Regresyon modelinde daha öncede belirtildiği üzere prensipler dikkate alındığında BD bağımlı değişken olarak etkilenen değişken olup, bağımsız değişkenler ise; Kriyojenik işlem sıcaklıkları (-140 °C, -100 °C, -40 °C) ve rutubet miktarları (HK, LD, SD) etkileyen değişkenlerdir. Bu bağlamda, yapılan çalışmada liflere paralel basma direnci, Kİ ve RM arasındaki etkileşimden faydalanarak, regresyon analizi ile elde edilen ikinci dereceden matematiksel model aşağıda sunulmuştur.

$$BD = 62,86 + 0,0325 KI - 10,58 RM + 0,000259 KI * KI + 2,100 RM * RM \quad (7.16)$$

$$R^2 = \%86,21$$

Eşitlik 7.16’da ikinci dereceden quadratik regresyon denklemi elde edilmiştir. R² regresyon denkleminin belirlilik katsayısını ifade etmektedir Bu değer bağımlı ve bağımsız değerler arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ifade etmektedir. Buradan yola

çıkarak, deneysel çalışmada bağımlı değişken olan basınç direncinin oluşma oranında kuvvetli etkiye sahip olduğu düşünülerek seçilen bağımsız faktörlerin (Kİ ve RM) doğru tahmin edildiği, BD'deki değişimi yaklaşık %86 oranında açıkladığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, regresyon modeli ile de yapılan çalışmada iyi bir öngöründe bulunulduğu ve çalışmanın realiteler ile paralel olduğu sonucuna varılmaktadır.

7.4.4. Doğrulama Deneyleri ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması

Taguchi yönteminin son işlem basamağı olarak 3 adet doğrulama deneyi belirlenen optimum faktör seviyelerine göre (A1B1) gerçekleştirilmiştir. Bu durumda optimum deneysel parametrelerin bireysel etkileri göz önünde bulundurularak A1B1 için maksimum BD tahmin değeri (BD_t) aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır. Bu değerlerin hesaplanmasında Çizelge 7.16 (BD için S/G yanıt tablosu) ve aşağıdaki denklemler kullanılarak S/G oranları gerçek değerlere dönüştürülmek suretiyle tahmin yapılmıştır [86].

$$\eta_g = A1 + B1 - \eta_{S/G} \quad (7.17)$$

$$BD_t = 10^{\eta_g/20} \quad (7.18)$$

Eşitlik 7.17'de A1 ve B1 faktörlerin optimum seviyelerine ait S/G oranlarıdır. $\eta_{S/G}$, bütün faktörlerin S/G oranlarının ortalamasıdır. Eşitlik 7.18'de η_g , optimum seviyeler için hesaplanan S/G oranıdır. Bu değerler dikkate alındığında optimum seviyeler için tahmin $BD_t = 54,89 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin doğruluğu için güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı maksimum ve minimum bir değerdir.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,Ve} \times V_{ep} \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (7.19)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (7.20)$$

Eşitlik 7.19'da $F_{\alpha,1,Ve}$ önem düzeyi α 'nın F oranı, α önem düzeyi (%95), $1 - \alpha$ güven aralığı, Ve hatanın serbestlik derecesi, V_{ep} hatanın varyansı, r doğrulama deney sayısı ve n_{eff} etkin ölçülen sonuçların sayısıdır. Eşitlik 7.20'de $N = 9$ toplam deney sayısını, $V_t = 4$ Çizelge 7.17 dikkate alınarak deney parametrelerine ait toplam serbestlik derecesini ifade etmektedir [86]. Buna göre $n_{eff} = 1,8$ olarak bulunmuştur. BD için %95 güven aralığında

yapılan değerlendirmede $V_e = 4$ dikkate alınarak $F_{\alpha:1,V_e} = 7,71$ olarak bulunmuş ve $V_{ep} = 1,633$ olarak Çizelge 7.17'ten okunmuştur. Bu çalışmada optimum parametreler kullanılarak 3 doğrulama deneyi yapılmıştır. Dolayısı ile Eşitlik 7.19 ve 7.20 kullanılarak $CI = 3,328$ olarak hesaplanmıştır. BD için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu %95 güven aralığı dikkate alınarak $(54,89 \text{ N/mm}^2 \pm 3,328)$ ya da $(51,562 \text{ ile } 58,218 \text{ N/mm}^2)$ arası beklenmektedir. Optimum faktör seviyeleri dikkate alınarak yürütülen 3 adet doğrulama deneylerinde BD değerleri sırasıyla 56,859, 52,886, 57,170 N/mm^2 olarak elde edilmiş ve bunların ortalaması 55,638 N/mm^2 olarak hesaplanmış, doğrulama deneyleri ortalaması belirlenen güven düzeyinde $(51,562 < 55,638 < 58,218 \text{ N/mm}^2)$ gerçekleşmiştir. Çizelge 7.18'de Taguchi metodu ile elde edilen tahmin değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tahmin değerler ile gerçek deneysel sonuçların hata oranı %20'den düşük olmalıdır.

Çizelge 7.18. BD için Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Faktör Seviyeleri	BD Deneysel	BD _t (N/mm^2)	Hata (%)
A1B1 (Optimum)	55,638	54,89	1,34
A3B3 (Rastgele)	51,618	49,14	4,8

Çizelge 7.18'den görüldüğü üzere tahmin hatası küçük çıkmış olup ($< \%20$) basınç direnci deneylerine Taguchi metodu başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

7.5. LİFLERE PARALEL ÇEKME DİRENCİ DENEYSEL OPTİMİZASYONU

Çekme direnci ahşap malzemeyi iki ucundan kavrayarak liflere paralel ve uygulanan kuvvetler bakımından birbirine zıt şekilde uygulanması neticesinde ahşabın kopmaya veya ayrılmaya karşı gösterdiği dirençtir [80]. Bu direnç kalın zarlı ve düzgün lifli ahşap malzemede yüksek direnç özelliği göstermek ile birlikte lif kırıklığı ve budak gibi anatomik etkenler direnç özelliğini azaltmaktadır [80].

Çalışmanın bu bölümünde en yüksek ÇD değerini veren kriyojenik işlem sıcaklığı ve rutubet miktarı parametrelerini belirlemek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu doğrultuda çekme direnci değerleri için Taguchi optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve optimum ÇD değerini veren RM ve Kİ parametreleri belirlenmiştir. Çalışmaya esas Taguchi L₉ deney tasarımına göre oluşturulan faktör kombinasyonları için elde edilen ÇD

değerleri ile hesaplanan S/G oranları 7.19’da verilmiştir.

Çizelge 7.19. Çekme direnci için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.

Deney Numarası	Değişkenler	Kİ (°C) (A)	RM (B)	ÇD (N/mm ²)	ÇD-S/G Oranı (dB)
1	A1B1	-140	HK	120,824	41,6431
2	A1B2	-140	LD	113,256	41,0812
3	A1B3	-140	SD	109,514	40,7894
4	A2B1	-100	HK	107,753	40,6486
5	A2B2	-100	LD	93,538	39,4198
6	A2B3	-100	SD	93,453	39,4118
7	A3B1	-40	HK	99,280	39,9372
8	A3B2	-40	LD	91,383	39,2173
9	A3B3	-40	SD	87,842	38,8741

Çizelge 7.19’da görüldüğü üzere, en yüksek ÇD değeri HK rutubet miktarında -140 °C’de kriyojenik işlem gören örneklerde (120,824N/mm²), en düşük ÇD değeri ise -40 °C’de kriyojenik işlem gören SD rutubet miktarına sahip örneklerde görülmüştür (87,842 N/mm²). Gerçekleştirilen 9 deney sonucunda ÇD-S/G oranlarının ortalaması 40,114 dB olarak belirlenmiştir.

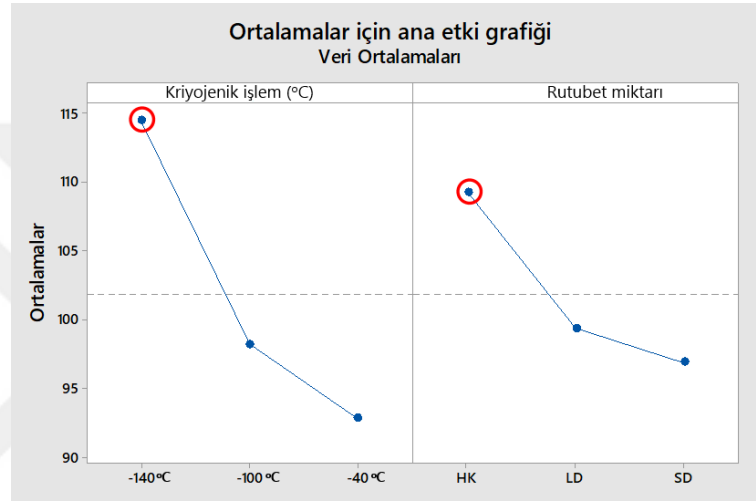
Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ve performans karakteristiği (ÇD) üzerinde bu faktörler arasından en etkili olanın belirlenmesinde Taguchi metoduyla oluşturulan S/G yanıt tablosu kullanılmaktadır. Bu tablodaki en büyük S/G değerleri, o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi göstermektedir. ÇD üzerinde her bir kontrol faktörünün etkisini gösteren S/G yanıt tablosu Çizelge 7.20’de verilmiştir.

Çizelge 7.20. ÇD için S/G yanıt tablosu.

Seviyeler	Kİ	RM
Seviye 1	41,17	40,74
Seviye 2	39,83	39,91
Seviye 3	39,34	39,69
Delta	1,83	1,05
Sıralama	1	2

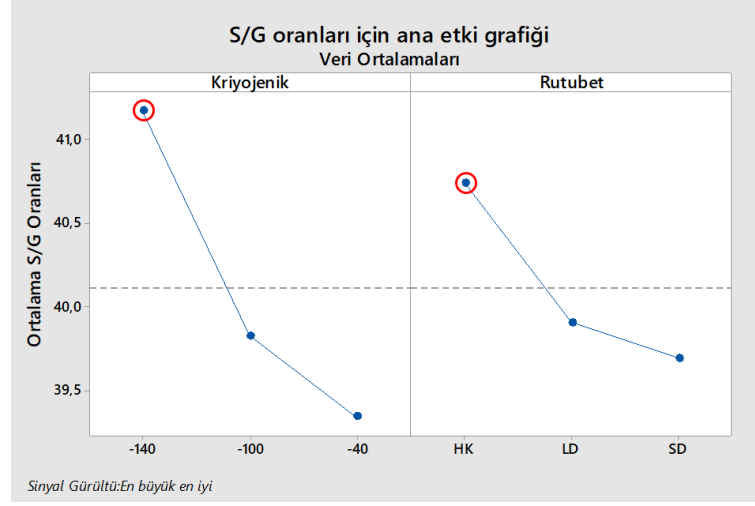
Çizelge 7.20 incelendiğinde ahşap malzemenin ÇD üzerinde kontrol faktörlerinden kriyojenik işlemin, rutubet miktarına göre ÇD değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yapılan varyans analizi ile doğrulanmış ve her bir faktörün sonuç değer üzerindeki katkı düzeyleri belirlenmiştir. Bununla birlikte Sarıçam örneklerin ÇD değerinin optimum olduğu faktör seviyeleri RM ve Kİ sıcaklığının birinci seviyelerinde elde edilmiştir (RM = HK ve Kİ sıcaklığı = -140 °C).

Kontrol faktörlerinin ÇD göre optimum değerlerini gösteren ortalamalar için ana etki grafiği Şekil 7.13’de S/G oranları için ana etki grafiği ise Şekil 7.14’de verilmiştir.



Şekil 7.13. Ortalamalar için ana etki grafiği (ÇD).

Malzemenin kullanım yerinde ÇD değerinin olabildiğince yüksek olması arzu edilmektedir. Bu nedenle gerek ortalamalar için ana etki grafiğinde gerekse S/G oranları için ana etki grafiğinde en yüksek değere sahip kontrol faktörü değerini sağlayan faktör seviyeleri o parametreye ait optimum seviyeyi göstermektedir. Şekil 7.13 ve 7.14’den görüldüğü üzere ÇD değeri için optimum işlem parametrelerinin her iki kontrol faktörünün de birinci seviyesi olan -140 °C Kİ sıcaklık ve HK rutubet miktarında elde edildiği görülmektedir (A1B1).

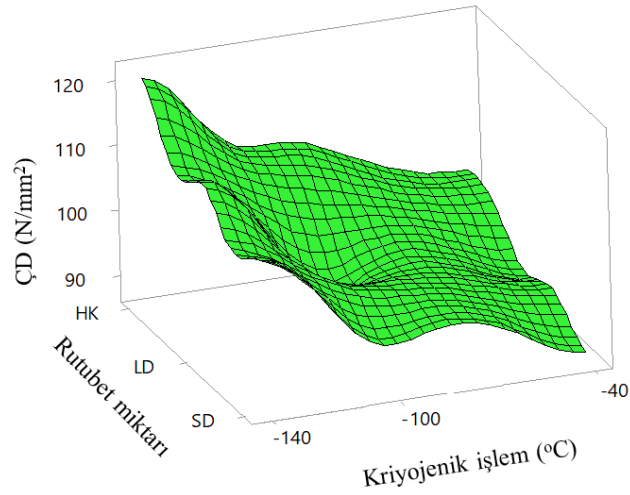


Şekil 7.14. S/G oranları için ana etki grafiği (ÇD).

Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’de farklı RM ve Kİ sıcaklığına maruz bırakılmak suretiyle modifiye edilen Sarıçam örnekler için Kİ sıcaklığı düştükçe ve RM azaldıkça çekme direnci değerinin artış gösterdiği görülmektedir. Bu sonuçlar ahşap malzemede RM’nin ÇD’yi olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Ahşap malzeme RM’sine bağlı olarak ÇD değerlerindeki değişim incelendiğinde RM arttıkça ÇD’nin tedrici olarak azaldığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarından bağımsız olarak Rutubet miktarının ÇD üzerindeki etkisi dikkate alındığında en yüksek ortalamanın (109,28 N/mm²) HK rutubet miktarına sahip örnekler olduğu görülmektedir. Rutubet miktarından bağımsız olarak kriyojenik işlem sıcaklıklarının ÇD üzerindeki etkisi dikkate alındığında ise en yüksek ÇD ortalamasının (114,53 N/mm²) -140 °C’de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak Sarıçam örnekler için optimum faktör seviyeleri -140 °C’de kriyojenik işlem sıcaklığı ve HK rutubet miktarı (A1B1) olarak belirlenmiştir.

7.5.1. Çekme Direnci Deneysel Sonuçların Yorumlanması

Sarıçam örneklere L₉ (3²) ortogonal dizisine göre uygulanan deneyler sonucu kontrol faktörlerine bağlı olarak çekme direnci değerleri belirlenmiştir. Kullanılan Kİ ve RM’ye göre ÇD değerlerindeki değişimler Şekil 7.15’de verilmiştir.



Şekil 7.15. Kİ ve RM'nin ÇD üzerindeki etkisi.

Şekil 7.15'den anlaşılacağı üzere genel olarak ahşap malzeme ÇD değerlerinin yaklaşık olarak 87 N/mm^2 ile 121 N/mm^2 arasında değiştiği görülmektedir. Tüm örnekler göz önünde bulundurulduğunda ÇD değerlerinin RM ve Kİ sıcaklığı arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu değişim RM ve Kİ sıcaklığına bağlı olarak belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Şekil 7.15'den görüldüğü üzere en yüksek ÇD değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde, en düşük değeri ise SD örneklerde görülmüştür. Bu durum rutubet miktarındaki artışın çekme direncini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde uygulanan Kİ'ye bağlı olarak ÇD değerlendirildiğinde Kİ sıcaklıkları pozitif sıcaklıklara yaklaştıkça ÇD değerlerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 7.15'de Kİ'ye göre ÇD değerlerindeki değişim incelendiğinde, en yüksek ÇD değerinin $-140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de Kİ'ye maruz kalan örneklerde görülürken en düşük ÇD değerinin $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de Kİ'ye maruz kalan örneklerde ortaya çıktığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarına bağlı olarak, $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sıcaklık düştüğünde %6'lık bir iyileşme olduğu, $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sıcaklık düştüğünde ise ÇD değerinde %17'lik bir iyileşme olduğu görülmektedir. Bu durum derin kriyojenik işlemin sıg kriyojenik işleme göre ÇD değeri üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak ahşap malzeme rutubet miktarından bağımsız olarak kriyojenik işlem uygulamasının malzemenin ÇD üzerinde olumlu bir etki sağladığını göstermektedir. Uygulanan kriyojenik işlem sıcaklığından bağımsız olarak ahşap malzemenin rutubet miktarına bağlı ÇD değerleri incelendiğinde ise tüm örneklerde en düşük ÇD değerleri SD rutubet miktarına sahip örneklerde ölçüldüğü görülmüştür. Rutubet miktarına bağlı ÇD değerlerindeki değişim HK rutubet miktarı ile LD rutubet miktarı arasında yaklaşık %10 iken LD rutubet miktarı ile SD rutubet miktarına sahip

örneklerdeki değişim yaklaşık %3 oranında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar LD rutubet noktasının üzerinde rutubet miktarına sahip olunmasının malzemenin mekanik özellikleri üzerinde daha az değişime sebep olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Bu durum literatürdeki çalışmalar ile uyumludur. Ahşap malzemenin RM'ye bağlı olarak mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimi ele alan çok sayıda çalışmada artan RM'nin ağaç malzeme mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Gerhards (1982), Ağaç malzeme RM %12'den %6 oranına düştüğünde liflere paralel çekme direnci değeri %8, oranında artarken, RM %20 oranına arttığında liflere paralel çekme direnci değeri %15 azaldığını ortaya koymaktadır [5].

Isıl işlem ile kriyojenik işlemin ahşap malzeme ÇD değeri üzerine etkileri karşılaştırıldığında, daha öncede bahsedildiği üzere ısıl işlemin ahşap malzemede direnç kayıplarına yol açtığı, bu kaybın kütle kaybı ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Bu kütle kaybı ahşap malzeme mekanik özelliklerden ÇD değerini olumsuz yönde etkilemektedir [37]. Yapılan literatür taramasında Korkut ve arkadaşları (2008), ısıl işlemin Sarıçam odunu bazı teknolojik özellikleri üzerine etkilerini araştıran çalışmasında Sarıçam örneklerinin artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak kontrol grupları ile ısıl işleme maruz kalmış numunelerin kıyaslanması sonucunda, ÇD'nin 180 °C'de 10 saat ısıl işlem gören numunelerinde %46,22 oranında kayıplar yaşandığını belirtmiştir [88]. Kriyojenik işlemin ağaç malzeme ÇD üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile kriyojenik işleme maruz bırakılan ÇD numune değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde -140 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %3,2, SD örneklerde %1 oranında bir kayıp olduğu ve LD örneklerde ise %19,9'luk bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. -100 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %13,7, LD örneklerde %0,9 ve SD örneklerde %15,4 oranında bir kayıp olduğu gözlenmiştir. Son olarak -40 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %20,4, LD örneklerde %3,1 ve SD örneklerde %20,5 oranında bir kayıp olduğu gözlenmiştir. Literatürden de görüldüğü üzere pozitif yüksek sıcaklıklarla ahşap malzemenin modifikasyonu olan ısıl işlem ÇD'nin 180 °C'de 10 saat ısıl işlem gören numunelerinde %46,22 oranında kayıplar yaşandığını, kriyojenik işlem sıcaklığına maruz bırakılan malzemede ise farklı rutubet miktarına sahip -140 °C'deki örneklerde yaklaşık %3 kayıp ile %20 arasında değişen iyileştirmeler olduğu görülmüştür.

7.5.2. Çekme Direnci İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Kontrol faktörü olan kriyojenik işlem ve RM değerinin ÇD üzerindeki etkilerini tespit etmek için yapılan ANOVA sonuçları Çizelge 7.21’de verilmiştir. Bu analiz %95 güvenilirlik ve %5 önem seviyelerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.21. ÇD için S/G oranı için ANOVA sonuçları.

Kontrol faktörü	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F değeri	P değeri (P<0,05)	Katkı oranı (%)
Kriyojenik işlem	2	765,18	382,589	108,70	0,000*	73,88
Rutubet miktarı	2	256,42	128,210	36,43	0,003*	24,76
Hata	4	14,08	3,520			1,36
Toplam	8	1035,68				100,00

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

Çizelge 7.21’de görüldüğü üzere her bir değişkenin önem seviyesini gösteren F değerleri ve yüzde etki oranları görülmektedir. Çizelgede belirtildiği üzere F değeri en yüksek olan kontrol faktörü, performans karakteristiğine en fazla etki eden faktördür. ÇD değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre ÇD üzerinde en etkili parametrenin %73,88 oranıyla Kİ’nin olduğu ve RM’nin ise %24,76 gibi bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Örneklerin ÇD üzerinde Kİ ve RM faktörleri istatistiksel olarak anlamlı bir etken olduğu görülmüştür ($P \leq 0,05$).

7.5.3. Çekme Direnci İçin Regresyon Analizi

Regresyon modelinde daha öncede belirtildiği üzere prensipler dikkate alındığında ÇD bağımlı değişken olarak etkilenen değişken olup, bağımsız değişkenler ise; Kriyojenik işlem sıcaklıkları (-140 °C, -100 °C, -40 °C) ve rutubet miktarları (HK, LD, SD) etkileyen değişkenlerdir. Bu bağlamda, yapılan çalışmada liflere paralel çekme direnci, Kİ ve RM arasındaki etkileşimden faydalanarak, regresyon analizi ile elde edilen ikinci dereceden matematiksel model aşağıda sunulmuştur.

$$\text{ÇD} = 126,65 + 0,3534 \text{ Kİ} - 21,05 \text{ RM} + 0,003169 \text{ Kİ} * \text{Kİ} + 3,72 \text{ RM} * \text{RM} \quad (7.21)$$

$$R^2 = \%98,64$$

Eşitlik 7.21’de ikinci dereceden kuadratik regresyon denklemi elde edilmiştir. R^2

regresyon denkleminin belirlilik katsayısını ifade etmektedir. Bu değer bağımlı ve bağımsız değerler arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ifade etmektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel çalışmada bağımlı değişken olan çekme direncinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülerek göz önünde bulundurulan bağımsız değişkenlerin (Kİ ve RM) doğru tahmin edildiği ve çekme direncinin değişimi yaklaşık %98 oranında açıkladığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, regresyon modeli ile yapılan çalışmada iyi bir öngörüle bulunulduğu ve çalışmanın realiteler ile paralel olduğu sonucuna varılmaktadır.

7.5.4. Doğrulama Deneyleri ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması

Taguchi yönteminin son işlem basamağı olarak 3 adet doğrulama deneyi belirlenen optimum faktör seviyelerine göre (A1B1) gerçekleştirilmiştir. Bu durumda optimum deneysel parametrelerin bireysel etkileri göz önünde bulundurularak A1B1 için maksimum ÇD tahmin değeri (\hat{CD}_t) aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır. Bu değerlerin hesaplanmasında Çizelge 7.120 (ÇD için S/G yanıt tablosu) ve aşağıdaki denklemler kullanılarak S/G oranları gerçek değerlere dönüştürülmek suretiyle tahmin yapılmıştır [86].

$$\eta_g = A1 + B1 - \eta_{S/G} \quad (7.22)$$

$$\hat{CD}_t = 10^{\eta_g/20} \quad (7.23)$$

Eşitlik 7.22’de A1 ve B1 faktörlerin optimum seviyelerine ait S/G oranlarıdır. $\eta_{S/G}$, bütün faktörlerin S/G oranlarının ortalamasıdır. Eşitlik 7.23’de η_g , optimum seviyeler için hesaplanan S/G oranıdır. Bu değerler dikkate alındığında optimum seviyeler için tahmin $\hat{CD}_t = 123,169 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin doğruluğu için güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı maksimum ve minimum bir değerdir.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,Ve} \times V_{ep} \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (7.24)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (7.25)$$

Eşitlik 7.24’de $F_{\alpha,1,Ve}$ önem düzeyi α ’nın F oranı, α önem düzeyi (%95), $1 - \alpha$ güven aralığı, Ve hatanın serbestlik derecesi, V_{ep} hatanın varyansı, r doğrulama deney sayısı ve

n_{eff} etkin ölçülen sonuçların sayısıdır. Eşitlik 7.25’de $N = 9$ toplam deney sayısını, $V_i = 4$ Çizelge 7.22 dikkate alınarak deney parametrelerine ait toplam serbestlik derecesini ifade etmektedir [86]. Buna göre $n_{eff} = 1,8$ olarak bulunmuştur. ÇD için %95 güven aralığında yapılan değerlendirmede $V_e = 4$ dikkate alınarak $F_{\alpha:1,V_e} = 7,71$ olarak bulunmuş ve $V_{ep} = 3,52$ olarak Çizelge 7.21’den okunmuştur. Bu çalışmada optimum parametreler kullanılarak 3 doğrulama deneyi yapılmıştır. Dolayısı ile Eşitlik 7.24 ve 7.25 kullanılarak $CI = 4,89$ olarak hesaplanmıştır. ÇD için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu %95 güven aralığı dikkate alınarak $(123,169 \text{ N/mm}^2) \pm 4,89$ ya da $(118,279 \text{ ile } 128,059 \text{ N/mm}^2)$ arası beklenmektedir. Optimum faktör seviyeleri dikkate alınarak yürütülen 3 adet doğrulama deneylerinde ÇD değerleri sırasıyla 74,622, 109,533, 132,842 N/mm^2 olarak elde edilmiş ve bunların ortalaması $124,588 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplanmış, doğrulama deneyleri ortalaması belirlenen güven düzeyinde $(118,279 < 124,588 < 128,059 \text{ N/mm}^2)$ gerçekleşmiştir. Çizelge 7.22’de Taguchi metodu ile elde edilen tahmin değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tahmin değerler ile gerçek deneysel sonuçların hata oranı %20’den düşük olmalıdır.

Çizelge 7.22. ÇD için Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Faktör Seviyeleri	ÇD Deneysel	ÇD _t (N/mm^2)	Hata (%)
A1B1 (Optimum)	124,588	123,169	1,13
A3B2 (Rastgele)	88,357	90,53	2,4

Çizelge 7.22’den görüldüğü üzere tahmin hatası küçük çıkmış olup ($< \%20$) çekme direnci deneylerine Taguchi metodu başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

7.6. BRİNELL SERTLİK DEĞERİNİN DENEYSEL OPTİMİZASYONU

Sertlik, ahşap malzemelerin sürtünme, işlenebilme ve kalıcı şekil değiştirme gibi mekanik özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar. Genellikle sertlik ile işlenebilme özelliği arasında ters bağıntı vardır. Diğer bir deyişle, sert malzemeleri işlemek zordur [79]. Sertlik değeri, malzemelerin kullanım yerlerindeki davranış özelliklerinin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan temel bir ölçüttür.

Çalışmanın bu bölümünde en yüksek BS değerini veren kriyojenik işlem sıcaklığı ve rutubet miktarı parametrelerini belirlemek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu

doğrultuda Brinell sertlik değerleri için Taguchi optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve optimum BS değerini veren RM ve Kİ parametreleri belirlenmiştir. Çalışmaya esas Taguchi L₉ deney tasarımına göre oluşturulan faktör kombinasyonları için elde edilen BS değerleri ile hesaplanan S/G oranları Çizelge 7.23’de verilmiştir.

Çizelge 7.23. Brinell serlik için deneysel sonuçlar ve S/G oranları.

Deney Numarası	Değişkenler	Kİ (°C) (A)	RM (B)	BS (N/mm ²)	BS-S/G Oranı (dB)
1	A1B1	-140	HK	21,93	26,8227
2	A1B2	-140	LD	20,80	26,3599
3	A1B3	-140	SD	15,94	24,0519
4	A2B1	-100	HK	21,82	26,7757
5	A2B2	-100	LD	20,10	26,0639
6	A2B3	-100	SD	16,16	24,1673
7	A3B1	-40	HK	21,00	26,4462
8	A3B2	-40	LD	19,43	25,7707
9	A3B3	-40	SD	16,45	24,3232

Çizelge 7.23’de görüldüğü üzere, en yüksek BS değeri HK rutubet düzeyinde -140 °C’de kriyojenik işlem gören örneklerde (21,93 N/mm²), en düşük BS değeri ise -140 °C’de kriyojenik işlem gören SD rutubet miktarına sahip örneklerde görülmüştür (15,94 N/mm²). Gerçekleştirilen 9 deney sonucunda BS-S/G oranlarının ortalaması 25,64 dB olarak belirlenmiştir.

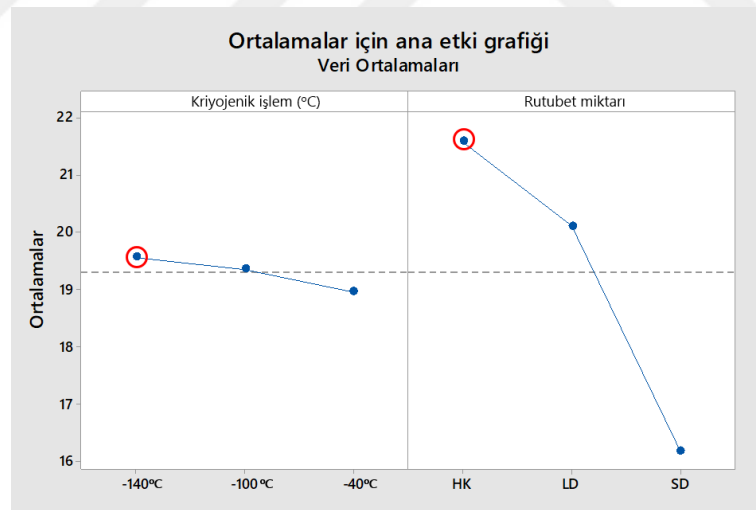
Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ve performans karakteristiği (BS) üzerinde bu faktörler arasından en etkili olanın belirlenmesinde Taguchi metoduyla oluşturulan S/G yanıt tablosu kullanılmaktadır. Bu tablodaki en büyük S/G değerleri, o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi göstermektedir. SD değeri üzerinde her bir kontrol faktörünün etkisini gösteren S/G yanıt tablosu Çizelge 7.24’de verilmiştir.

Çizelge 7.24. BS değeri için S/G yanıt tablosu.

Seviyeler	Kİ	RM
Seviye 1	25,74	26,68
Seviye 2	25,67	26,06
Seviye 3	25,51	24,18
Delta	0,23	2,5
Sıralama	2	1

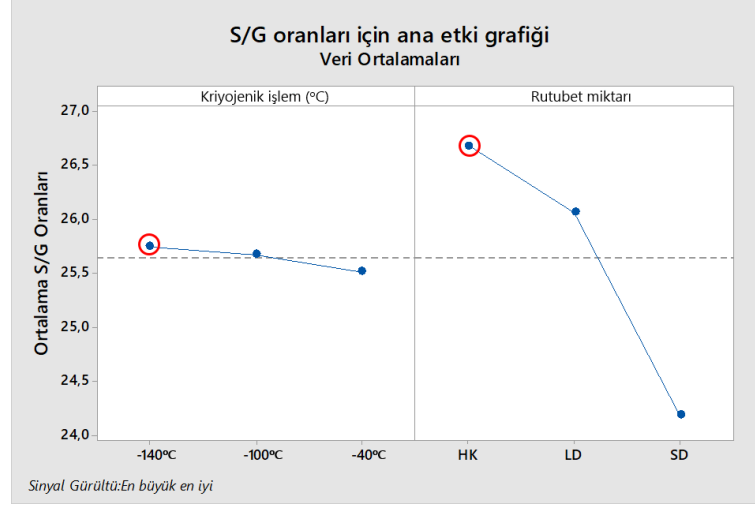
Çizelge 7.24 incelendiğinde ahşap malzemenin BS değeri üzerinde kontrol faktörlerinden rutubet miktarının Kİ sıcaklıklarına göre BS değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yapılan varyans analizi ile doğrulanmış ve her bir faktörün sonuç değer üzerindeki katkı düzeyleri belirlenmiştir. Bununla birlikte Sarıçam örneklerin BS değerinin optimum olduğu faktör seviyeleri RM ve Kİ sıcaklıkları birinci seviyelerinde elde edilmiştir (RM = HK ve Kİ sıcaklığı = -140 °C).

Kontrol faktörlerinin BS değerine göre optimum değerlerini gösteren ortalamalar için ana etki grafiği Şekil 7.16'da, S/G oranları için ana etki grafiği ise Şekil 7.17'de verilmiştir.



Şekil 7.16. Ortalamalar için ana etki grafiği (BS).

Malzemenin kullanım yerinde BS değerinin yüksek olması arzu edilmektedir. Bu nedenle gerek ortalamalar için ana etki grafiğinde gerekse S/G oranları için ana etki grafiğinde en yüksek değere sahip kontrol faktörü değerini sağlayan faktör seviyeleri o parametreye ait optimum seviyeyi göstermektedir. Şekil 7.16 ve 7.17'den görüldüğü üzere BS değeri için optimum işlem parametrelerinin her iki kontrol faktörünün de birinci seviyesi olan -140 °C Kİ sıcaklığı ve HK rutubet miktarında elde edildiği görülmektedir (A1B1).

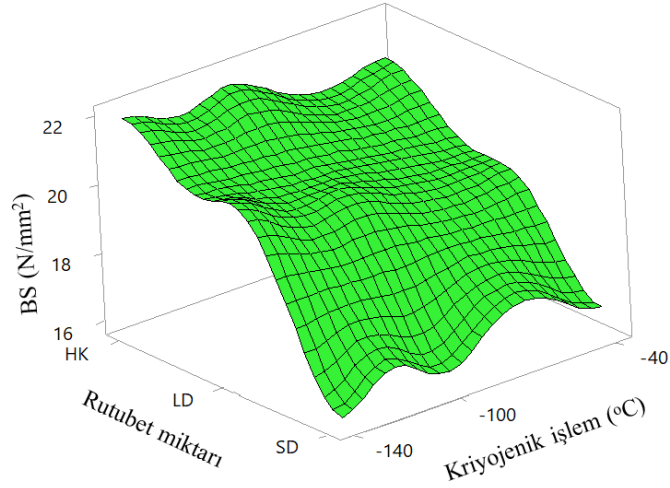


Şekil 7.17. S/G oranları için ana etki grafiği (BS).

Şekil 7.17 ve Şekil 7.8’de görüldüğü üzere farklı RM ve Kİ sıcaklığına maruz bırakılmak suretiyle modifiye edilen Sarıçam örnekler için Kİ sıcaklığı düştükçe ve RM azaldıkça Brinell sertlik değerinin artış gösterdiği görülmektedir. Bu sonuçlar ahşap malzemede rutubet miktarının BS’yi olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Ahşap malzeme RM’sine bağlı olarak BS değerlerindeki değişim incelendiğinde RM arttıkça BS’nin tedrici olarak azaldığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarından bağımsız olarak Rutubet miktarının BS üzerindeki etkisi dikkate alındığında en yüksek ortalamasının (21,58 N/mm²) HK rutubet miktarına sahip örnekler olduğu görülmektedir. Rutubet miktarından bağımsız olarak kriyojenik işlem sıcaklıklarının BS üzerindeki etkisi dikkate alındığında ise en yüksek BS ortalamasının (19,55 N/mm²) -140 °C’de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak Sarıçam örnekler için optimum faktör seviyeleri -140 °C’de kriyojenik işlem sıcaklığı ve HK rutubet miktarı olarak belirlenmiştir (A1B1).

7.6.1. Brinell Sertlik Değeri İçin Deneysel Sonuçların Yorumlanması

Sarıçam örnekler L₉ (3²) ortogonal dizisine göre uygulanan deneyler sonucu kontrol faktörlerine bağlı olarak Brinell sertlik değerleri belirlenmiştir. Kullanılan Kİ ve RM’ye göre BS değerlerindeki değişimler Şekil 7.18’de verilmiştir.



Şekil 7.18. Kİ ve RM'nin BS değeri üzerindeki etkisi.

Şekil 7.18'den anlaşılacağı üzere genel olarak ahşap malzeme BS değerlerinin yaklaşık olarak 15 N/mm^2 ile 22 N/mm^2 arasında değiştiği görülmektedir. Tüm örnekler göz önünde bulundurulduğunda BS değerlerinin RM ve Kİ sıcaklığı arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu değişim RM'ye bağlı olarak belirgin bir şekilde azalırken Kİ bağlı olarak çok az etkilendiği görülmektedir. Şekil 7.18'de görüldüğü üzere en yüksek BS değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde, en düşük değer ise SD örneklerde görülmüştür. Bu durum rutubet miktarındaki artışın Brinell sertlik değerini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde uygulanan Kİ'ye bağlı olarak BS değerlendirildiğinde Kİ sıcaklıkları pozitif sıcaklıklara yaklaştıkça BS değerlerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 7.18'de Kriyojenik işlem göre BS değerlerindeki değişim incelendiğinde, en yüksek BS değerinin $-140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de Kİ'ye maruz kalan örneklerde görülürken en düşük BS değerinin $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kriyojenik işleme maruz kalan örneklerde ortaya çıktığı görülmektedir. Kİ sıcaklıklarına bağlı olarak, $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sıcaklık düştüğünde %2'lik bir iyileşme olduğu, $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $-140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sıcaklık düştüğünde ise BS değerinde %1'lik bir iyileşme olduğu görülmektedir. Bu durum kriyojenik işlemin BS değeri üzerinde azda olsa küçük bir iyileşme olduğunu göstermektedir. Uygulanan kriyojenik işlem sıcaklığından bağımsız olarak ahşap malzemenin rutubet miktarına bağlı BS değerleri incelendiğinde ise tüm örneklerde en düşük BS değerleri SD rutubet miktarına sahip örneklerde ölçüldüğü görülmüştür. Rutubet miktarına bağlı BS değerlerindeki değişim HK rutubet miktarı ile LD rutubet miktarı arasında yaklaşık %7 iken LD rutubet miktarı ile SD rutubet miktarına sahip örneklerdeki değişim yaklaşık %24 oranında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar LD rutubet

noktasının üzerinde rutubet miktarına sahip olunmasının malzemenin mekanik özellikleri üzerinde değişime sebep olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Bu durum literatürdeki çalışmalar ile uyumludur. Ahşap malzemenin RM'ye bağlı olarak mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimi ele alan çok sayıda çalışmada artan RM'nin ağaç malzeme mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Gerhards (1982), Ağaç malzeme RM %12'den %6 oranına düştüğünde BS değeri %30 oranında artarken RM %12'den %20 oranına arttığında %30 azaldığını ortaya koymaktadır [5].

Isıl işlem ile kriyojenik işlemin ahşap malzeme BS değeri üzerine etkileri karşılaştırıldığında daha öncede belirtildiği üzere ısıl işlemin ahşap malzeme mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği belirtilmişti [37]. Yapılan literatür taramasında Bal & Akçakaya (2016), yaptığı çalışmada 160, 180, 200 ve 220 °C'de Sarıçam örneklerine 2 saat boyunca uygulanan ısıl işlemin ağırlık kayıplarına neden olduğu, bu durumun ahşap malzeme sertlik değerinde yaklaşık %18 oranında azalma meydana getirdiğini belirtmiştir [89]. Kriyojenik işlemin ağaç malzeme BS değeri üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile kriyojenik işleme maruz bırakılan BS değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde -140 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %11,7, LD örneklerde %7,5 oranında bir iyileşme olduğu ve SD örneklerde ise %11,8'lik bir kayıp olduğu gözlenmiştir. -100 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %11,2, LD örneklerde %3,9 oranında bir iyileşme olduğu ve SD örneklerde ise %10,6 oranında bir kayıp olduğu gözlenmiştir. Son olarak -40 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %7 oranında bir iyileşme olduğu, LD örneklerde kayda değer bir değişim olmadığı ve SD örneklerde ise %9 oranında bir kayıp olduğu gözlenmiştir. Literatürden de görüldüğü üzere pozitif yüksek sıcaklıklarla ahşap malzemenin modifikasyonu olan ısıl işlem BS değerinde %18 varan oranında kayıplar yaşandığını, kriyojenik işlem sıcaklığına maruz bırakılan malzemedeler de HK rutubet miktarına sahip örneklerde tam tersine yaklaşık %5 ila %12 arasında değişen iyileştirmeler olduğu görülmüştür.

7.6.2. Brinell Sertlik Değeri İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Kontrol faktörlü olan kriyojenik işlem ve RM değerinin BS üzerindeki etkilerini tespit etmek için yapılan ANOVA sonuçları Çizelge 7.25'de verilmiştir. Bu analiz %95 güvenilirlik ve %5 önem seviyelerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.25. BS için S/G oranı için ANOVA sonuçları.

Kontrol faktörü	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F oranı	P değeri (P<0,05)	Katkı oranı (%)
Kriyojenik işlem	2	0,5522	0,2761	1,08	0,421*	1,14
Rutubet miktarı	2	46,7690	23,3845	91,68	0,000*	96,75
Hata	4	1,0202	0,2551			2,11
Toplam	8	48,3415				100,00

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

Çizelge 7.25’de görüldüğü üzere her bir değişkenin önem seviyesini gösteren F değerleri ve yüzde etki oranları görülmektedir. Çizelgede belirtildiği üzere F değeri en yüksek olan kontrol faktörü, performans karakteristiğine en fazla etki eden faktördür. BS değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre BS üzerinde en etkili parametrenin %96,75 oranıyla RM olduğu ve Kİ’nin ise %1,14 gibi bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Örneklerin BS üzerinde Kİ faktörü istatistiksel olarak anlamsız ($P > 0,05$), RM faktörü ise istatistiksel olarak anlamlı bir etken olduğu görülmüştür ($P \leq 0,05$).

7.6.3. Brinell Sertlik Değeri İçin Regresyon Analizi

Regresyon modelinde daha öncede belirtilen prensipler dikkate alındığında BS bağımlı değişken olarak etkilenen değişken olup, bağımsız değişkenler ise; Kriyojenik işlem sıcaklıkları (-140 °C, -100 °C, -40 °C) ve rutubet miktarları (HK, LD, SD) etkileyen değişkenlerdir. Bu bağlamda, yapılan çalışmada Brinell sertlik değeri Kİ ve RM arasındaki etkileşimden faydalanarak, regresyon analizi ile elde edilen ikinci dereceden matematiksel model Eşitlik 7.26’da sunulmuştur.

$$BS = 19,95 - 0,0088 Kİ + 2,20 RM - 0,000016 Kİ * Kİ - 1,225 RM * RM \quad (7.26)$$

$$R^2 = \%97,89$$

Eşitlik 7.26’da ikinci dereceden quadratik regresyon denklemi elde edilmiştir. R^2 regresyon denkleminin belirlilik katsayısını ifade etmektedir. Bu değer bağımlı ve bağımsız değerler arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ifade etmektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel çalışmada bağımlı değişken olan BS değerinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülerek göz önünde bulundurulmuş bağımsız değişkenlerin (Kİ

ve RM) doğru tahmin edildiği ve BS'deki değişimi yaklaşık %97 oranında açıkladığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, regresyon modeli ile de yapılan çalışmada iyi bir öngöründe bulunulduğu ve çalışmanın realiteler ile paralel olduğu sonucuna varılmaktadır.

7.6.4. Doğrulama Deneyle ve Tahmin Değerlerin Hesaplanması

Taguchi yönteminin son işlem basamağı olarak 3 adet doğrulama deneyi belirlenen optimum faktör seviyelerine göre (A1B1) gerçekleştirilmiştir. Bu durumda optimum deneysel parametrelerin bireysel etkileri göz önünde bulundurularak A1B1 için maksimum BS tahmin değeri (BS_t) aşağıdaki Eşitlikler ile hesaplanmaktadır. Bu değerlerin hesaplanmasında Çizelge 7.24 (BS için S/G yanıt tablosu) ve aşağıdaki denklemler kullanılarak S/G oranları gerçek değerlere dönüştürülmek suretiyle tahmin yapılmıştır [86].

$$\eta_g = A1 + B1 - \eta_{S/G} \quad (7.27)$$

$$BS_t = 10^{\eta_g/20} \quad (7.28)$$

Eşitlik 7.27'de A1 ve B1 faktörlerin optimum seviyelerine ait S/G oranlarıdır. $\eta_{S/G}$, bütün faktörlerin S/G oranlarının ortalamasıdır. Eşitlik 7.28'de η_g , optimum seviyeler için hesaplanan S/G oranıdır. Bu değerler dikkate alındığında optimum seviyeler için tahmin $BS_t = 21,83 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin doğruluğu için güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı maksimum ve minimum bir değerdir.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,Ve} \times V_{ep} \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (7.29)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (7.30)$$

Eşitlik 7.29'da $F_{\alpha,1,Ve}$ önem düzeyi α 'nın F oranı, α önem düzeyi (%95), $1 - \alpha$ güven aralığı, Ve hatanın serbestlik derecesi, V_{ep} hatanın varyansı, r doğrulama deney sayısı ve n_{eff} etkin ölçülen sonuçların sayısıdır. Eşitlik 7.30'da $N = 9$ toplam deney sayısını, $V_t = 4$ Çizelge 7.25 dikkate alınarak deney parametrelerine ait toplam serbestlik derecesini ifade etmektedir [86]. Buna göre $n_{eff} = 1,8$ olarak bulunmuştur. BS için %95 güven aralığında yapılan değerlendirmede $Ve = 4$ dikkate alınarak $F_{\alpha,1,Ve} = 7,71$ olarak bulunmuş ve $V_{ep} = 0,2551$ olarak Çizelge 7.25'ten okunmuştur. Bu çalışmada optimum parametreler

kullanılarak 3 doğrulama deneyi yapılmıştır. Dolayısı ile Eşitlik 7.29 ve 7.30 kullanılarak $CI = 1,315$ olarak hesaplanmıştır. BS için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu %95 güven aralığı dikkate alınarak $(21,83 \text{ N/mm}^2 \pm 1,315)$ ya da $(20,515 \text{ ile } 23,145 \text{ N/mm}^2)$ arası beklenmektedir. Optimum faktör seviyeleri dikkate alınarak yürütülen 3 adet doğrulama deneylerinde BS değerleri sırasıyla 23,34, 21,04, 21,37 N/mm^2 olarak elde edilmiş ve bunların ortalaması 21,92 N/mm^2 olarak hesaplanmış, doğrulama deneyleri ortalaması belirlenen güven düzeyinde $(20,515 < 21,92 < 23,145 \text{ N/mm}^2)$ gerçekleşmiştir. Çizelge 7.26'da Taguchi metodu ile elde edilen tahmin değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tahmin değerler ile gerçek deneysel sonuçların hata oranı %20'den düşük olmalıdır.

Çizelge 7.26. BS için Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Faktör Seviyeleri	BS Deneysel	BS _t (N/mm ²)	Hata (%)
A1B1 (Optimum)	21,92	21,83	0,4
A2B3 (Rastgele)	14,77	16,23	9

Çizelge 7.26'dan görüldüğü üzere tahmin hatası küçük çıkmış olup ($< \%20$) Brinell sertlik deneylerine Taguchi metodu başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; Farklı rutubet miktarlarına (HK, LD, SD) sahip Sarıçam odununa kriyojenik işlemin (sığ (-40, -100 °C) – derin (-140 °C)) ağaç malzeme mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırılmış, ahşap malzemenin mekanik özelliklerinin tespiti için ilgili standartlara uygun olarak ED, EEM, KD, BD, ÇD ve BS deneyleri yapılmıştır. Ahşap malzemenin mekanik özellikleri üzerinde kontrol faktörlerinin (Kİ - RM) etkileri, optimum faktör parametreleri ve faktörlerin etki düzeylerinin belirlenmesi amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmış, sonuçlara ilişkin sayısal veriler elde edilmiştir. Elde edilen verilerin ışığında varılan sonuçlar yorumlanmış ve uygulamaya yönelik önerilerde bulunulmuştur.

8.1. LİFLERE DİK EĞİLME DİRENCİ

- Eğilme direnci değerlerinin RM ve Kİ sıcaklığı arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu değişim RM'ye bağlı olarak belirgin bir şekilde azalırken Kİ sıcaklığına bağlı olarak görece daha az etkilendiği görülmüştür.
- Eğilme direnci değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde en yüksek iken, en düşük ED değeri ise SD örneklerde görülmüştür. Bu durum rutubet miktarının ED'yi olumsuz etkilediğini göstermiştir.
- Ahşap malzemenin rutubet miktarı Kİ sıcaklığına göre ED değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmüştür.
- Eğilme direnci değerlerindeki değişim ise, en yüksek -140 °C'de kriyojenik işleme maruz kalan HK rutubet miktarına sahip örneklerde olduğu (93,176 N/mm²) görülmüştür. En düşük ED değeri ise -40 °C'de kriyojenik işlem gören SD rutubet miktarına sahip örneklerde (76,699 N/mm²) olduğu görülmüştür.
- Kriyojenik işlem sıcaklığına göre en yüksek ED ortalamasının (87,12 N/mm²) - 140 °C'de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği, rutubet miktarlarına göre ise, en yüksek ortalamasının HK rutubet miktarına sahip (90,37 N/mm²) örneklerde olduğu görülmüştür.

- Kriyojenik işlemin ağaç malzeme mekanik özelliklerden ED üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile kriyojenik işleme maruz bırakılan ED numune değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde -140 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %2,2, SD örneklerde %5,8 oranında bir iyileşme olduğu ve LD örneklerde ise %5,9'luk bir kayıp olduğu gözlenmiştir. -100 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %2,1, SD örneklerde %4,2 oranında bir iyileşme olduğu ve LD örneklerde ise %9,2'lik bir kayıp olduğu gözlenmiştir. Son olarak -40 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %6,9, LD örneklerde %13,1 ve SD örneklerde ise %2,1 oranında bir düşüş olduğu gözlenmiştir.
- Eğilme direnci değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre, ED üzerinde en etkili parametrenin %65,45 oranıyla RM olduğu ve kriyojenik işlemin ise %32,11 gibi bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- Örneklerin eğilme direnci üzerinde Kİ (0,015) ve RM (0,002) faktörlerinin etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür ($P \leq 0,05$).
- Eğilme direnci değerleri için gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçlarına göre, bağımlı değişken olan eğilme direncinin belirlenmesinde bağımsız değişkenlerin (Kİ ve RM) doğru tahmin edildiği ve eğilme direncindeki değişimi yaklaşık %97 oranında açıkladığı anlaşılmıştır.
- Eğilme direnci için %95 güven aralığı dikkate alınarak yapılan doğrulama deneyleri sonuçlarına göre tahmin hatası (optimum değerler için, %2,35, rastgele değerler için %1,4) çok küçük çıkmış ($< \%20$) bu durumun ED deneylerine Taguchi metodunun başarılı bir şekilde uygulandığını göstermiştir.

8.2. EĞİLMEDE ELASTİKİYET MODÜLÜ

- Ahşap malzemede eğilmede elastikiyet modülü değeri RM ve Kİ sıcaklığı arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu değişim eğilme direncine benzer şekilde RM'ye bağlı olarak belirgin bir şekilde azalırken Kİ sıcaklığına bağlı olarak görece daha az etkilendiği görülmüştür.
- Eğilmede elastikiyet modülü değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde en yüksek iken, en düşük EEM değeri ise SD örneklerde görülmüştür. Bu durum

rutubet miktarının EEM'yi olumsuz etkilediğini göstermiştir.

- Ahşap malzemenin rutubet miktarı Kİ sıcaklığına göre EEM değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmüştür.
- Eğilmede elastikiyet modülü değerlerindeki değişim ise, en yüksek EEM değerinin $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kriyojenik işleme maruz kalan HK rutubet miktarına sahip örneklerde (11869 N/mm^2) olduğu, en düşük EEM değeri ise $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kriyojenik işlem gören SD rutubet miktarına sahip örneklerde (9530 N/mm^2) olduğu görülmüştür.
- Kriyojenik işlem sıcaklığına göre en yüksek EEM ortalamasının (11034 N/mm^2) $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği, rutubet miktarlarına göre ise, en yüksek ortalamanın HK rutubet miktarına sahip (11492 N/mm^2) örneklerde olduğu görülmüştür.
- Kriyojenik işlemin ağaç malzeme mekanik özelliklerden EEM üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile kriyojenik işleme maruz bırakılan EEM numune değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %6, LD örneklerde %13,9 ve SD örneklerde ise %7 oranında bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %5,7, LD örneklerde %17 ve SD örneklerde ise %5,7 oranında bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. Son olarak $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %4, oranında düşüş olduğu LD örneklerde %9,5 oranında iyileşme olduğu ve SD örneklerde ise kayda değer bir değişimin olmadığı gözlenmiştir.
- Eğilmede elastikiyet modülü değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre EEM üzerinde en etkili parametrenin %71,70 oranıyla RM olduğu ve kriyojenik işlemin ise %24,89 oranında etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- Örneklerin uygulanan Kİ (0,015) ve RM (0,002) faktörlerinin EEM değeri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olduğu görülmüştür ($P \leq 0,05$).
- Eğilmede elastikiyet modülü değerleri için gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçlarına göre, bağımlı değişken olan eğilmede elastikiyet modülü değerinin belirlenmesinde bağımsız değişkenlerin (Kİ ve RM) doğru tahmin edildiği ve EEM değerindeki değişimi yaklaşık %96 oranında açıkladığı anlaşılmıştır.

- EEM değerleri için %95 güven aralığı dikkate alınarak yapılan doğrulama deneyleri sonuçlarına göre tahmin hatası (optimum değerler için, %4,23, rastgele değerler için %8,05) küçük çıkmış (< %20) bu durumun EEM deneylerine Taguchi metodunun başarılı bir şekilde uygulandığını göstermiştir.

8.3. LİFLERE PARALEL KESME DİRENCİ

- Ahşap malzemedede kesme direnci değerlerinin RM arttıķa belirgin bir şekilde azalma eğilimde olduğu, Kİ sıcaklığının pozitif sıcaklıklara yaklařtıķa KD değerlerinde ise kayda değer bir değişim olmadığı grlmştir.
- Kesme direnci değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde en yüksek iken, en düşük KD değeri ise SD örneklerde grlmştir.
- Ahşap malzemenin RM'si diğer sonuçlara paralellik göstermiş Kİ sıcaklığına göre KD değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu grlmştir.
- En yüksek KD değeri HK rutubet miktarında -100 C'de kriyojenik işlem gören örneklerde (12,503 N/mm²), en düşük KD değeri ise -100 C'de kriyojenik işlem gören SD rutubet miktarına sahip örneklerde (10,415 N/mm²) grlmştir.
- Kriyojenik işlem sıcaklığına göre en yüksek KD ortalamasının (11,645 N/mm²) -40 C'de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği, rutubet miktarlarına göre ise, en yüksek ortalamanın HK rutubet miktarına sahip (12,21 N/mm²) rneklerde olduğu grlmştir.
- Kriyojenik işlemin ağaç malzeme KD değeri üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile kriyojenik işleme maruz bırakılan KD numune değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde -140 C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %6,7 oranında bir iyileşme olduğu, LD örneklerde %5,6 oranında düşüş olduğu ve SD örneklerde kayda değer bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. -100 C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %9,8 iyileşme olduğu ve LD rneklerde %4,1, SD örneklerde ise %2,8 oranında bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Son olarak -40 C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK rneklerde %4,7, SD örneklerde %8,7 oranında iyileşme olduğu ve LD örneklerde ise %5,2 oranında düşüş olduğu ve gözlenmiştir.
- KD değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre KD üzerinde en etkili

parametrenin %71,71 oranıyla RM olduğu ve kriyojenik işlemin ise %2,53 gibi bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

- Örneklerin KD üzerinde Kİ (0,829) ve RM (0,07) faktörleri istatistiksel olarak anlamsız olduğu görülmüştür ($P > 0,05$).
- KD değerleri için gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçlarına göre, bağımlı değişken olan kesme direnci değerinin belirlenmesinde bağımsız değişkenlerin (Kİ ve RM) doğru tahmin edildiği ve KD değerindeki değişimi yaklaşık %76 oranında açıkladığı anlaşılmıştır.
- KD değerleri için %95 güven aralığı dikkate alınarak yapılan doğrulama deneyleri sonuçlarına göre tahmin hatası (optimum değerler için, %5,66, rastgele değerler için %2,8) küçük çıkmış ($< \%20$) bu durumun KD deneylerine Taguchi metodunun başarılı bir şekilde uygulandığını göstermiştir.

8.4. LİFLERE PARALEL BASINÇ DİRENCİ

- Ahşap malzemedeki basınç direnci değeri RM ve Kİ sıcaklığı arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu değişim RM'ye bağlı olarak belirgin bir şekilde azalırken Kİ sıcaklığına bağlı olarak görece daha az etkilendiği görülmüştür.
- Basınç direnci değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde en yüksek iken, en düşük BD değeri ise SD örneklerde görülmüştür. Bu durum rutubet miktarının BD'yi olumsuz etkilediğini göstermiştir.
- Diğer mekanik bulgulara paralel olarak ahşap malzemenin rutubet miktarı, Kİ sıcaklığına göre BD değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmüştür.
- Basınç direnci değerlerindeki değişim incelendiğinde, en yüksek BD değerinin - 140 °C'de kriyojenik işleme maruz kalmış HK rutubet düzeyine sahip örneklerde ($56,078 \text{ N/mm}^2$) görülürken en düşük BD değeri ise -100 °C'de kriyojenik işlem gören SD rutubet miktarına sahip örneklerde ($48,492 \text{ N/mm}^2$) olduğu görülmüştür.
- Kriyojenik işlem sıcaklığına göre en yüksek BD ortalamasının ($52,02 \text{ N/mm}^2$) - 140 °C'de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği, rutubet miktarlarına göre ise, en yüksek ortalamanın HK rutubet miktarına sahip ($54,04 \text{ N/mm}^2$) örneklerde olduğu görülmüştür.

- Kriyojenik işlemin ağaç malzeme BD üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile kriyojenik işleme maruz bırakılan BD numune değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde -140 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %12,8, LD örneklerde %4,6 ve SD örneklerde ise %2,5'lük bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. -100 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %7,5, LD örneklerde %7,2 oranında bir iyileşme olduğu ve SD örneklerde ise %1,8'lik bir kayıp olduğu gözlenmiştir. Son olarak -40 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %5,9, LD örneklerde %4,5 ve SD örneklerde ise %1 oranında bir iyileşme olduğu gözlenmiştir.
- Basınç direnci değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre BD üzerinde en etkili parametrenin %78,95 oranıyla RM olduğu ve kriyojenik işlemin ise %7,26 gibi bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- Örneklerin BD üzerinde Kİ (0,429) faktörü önemsiz ($P > 0,05$), RM (0,022) faktörü ise önemli bir etken olduğu görülmüştür ($P \leq 0,05$).
- Basınç direnci değerleri için gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçlarına göre, bağımlı değişken olan basınç direncinin belirlenmesinde bağımsız değişkenlerin (Kİ ve RM) doğru tahmin edildiği ve basınç direncindeki değişimi yaklaşık %86 oranında açıkladığı anlaşılmıştır.
- Basınç direnci değerleri için gerçekleştirilen doğrulama deneyleri %95 güven aralığı dikkate alınarak yapılmış olup, elde edilen sonuçlarına göre tahmin hatası (optimum değerler için, %1,34, rastgele değerler için %4,8) küçük çıkmış ($< \%20$) bu durumun BD deneylerine Taguchi metodunun başarılı bir şekilde uygulandığını göstermiştir.

8.5. LİFLERE PARALEL ÇEKME DİRENCİ

- Çekme direnci değerlerinin RM ve Kİ sıcaklığı arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Diğer mekanik özelliklerden farklı olarak bu değişim RM ve Kİ sıcaklığına bağlı olarak belirgin bir şekilde azaldığı görülmüştür.
- Çekme direnci değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde en yüksek iken, en düşük ÇD değeri ise SD örneklerde görülmüştür. Bu durum rutubet miktarının ÇD'yi olumsuz etkilediğini göstermiştir.

- Diğer mekanik özelliklerden farklı olarak kriyojenik işlemin rutubet miktarına göre ÇD değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmüştür.
- En yüksek ÇD değerinin -140 °C’de kriyojenik işleme maruz kalan HK rutubet miktarına sahip örneklerde (120,824 N/mm²) görülürken, en düşük ÇD değerinin ise -40 °C’de kriyojenik işleme maruz kalan SD rutubet miktarına sahip örneklerde (87,842 N/mm²) ortaya çıktığı görülmüştür.
- Kriyojenik işlem sıcaklığına göre en yüksek ÇD ortalamasının (114,53 N/mm²) -140 °C’de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği, rutubet miktarlarına göre ise, en yüksek ortalamanın HK rutubet miktarına sahip (109,28 N/mm²) örneklerde olduğu görülmüştür.
- Kriyojenik işlemin ağaç malzeme ÇD üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile kriyojenik işleme maruz bırakılan ÇD numune değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde -140 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %3,2, SD örneklerde %1 oranında bir kayıp olduğu ve LD örneklerde ise %19,9’luk bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. -100 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %13,7, LD örneklerde %0,9 ve SD örneklerde %15,4 oranında bir kayıp olduğu gözlenmiştir. Son olarak -40 °C Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %20,4, LD örneklerde %3,1 ve SD örneklerde %20,5 oranında bir kayıp olduğu gözlenmiştir.
- Çekme direnci değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre ÇD üzerinde en etkili parametrenin %73,88 oranıyla Kİ olduğu ve RM’nin ise %24,76 gibi bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- Örneklerin ÇD üzerinde Kİ (0) ve RM (0,03) faktörlerinin etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür ($P \leq 0,05$).
- Çekme direnci değerleri için gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçlarına göre, bağımlı değişken olan çekme direncinin belirlenmesinde bağımsız değişkenlerin (Kİ ve RM) doğru tahmin edildiği ve çekme direncindeki değişimi yaklaşık %98 oranında açıkladığı anlaşılmıştır.
- ÇD değerleri için %95 güven aralığı dikkate alınarak yapılan doğrulama deneyleri sonuçlarına göre tahmin hatası (optimum değerler için, %1,13, rastgele değerler için %2,4) küçük çıkmış (< %20) bu durumun ÇD deneylerine Taguchi

metodunun başarılı bir şekilde uygulandığını göstermiştir.

8.6. BRİNELL SERTLİK

- Brinell sertlik değerinin RM arttıkça azalma eğilimde olduğu Kİ'de ise görece kayda değer bir değişimin olmadığı görülmüştür. Bu değişim RM'ye bağlı olarak belirgin bir şekilde azalırken Kİ sıcaklıklarının BS değeri üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Brinell sertlik değeri HK rutubet miktarına sahip örneklerde en yüksek iken, en düşük BS değeri ise SD örneklerde görülmüştür. Bu durum rutubet miktarının BS değerini olumsuz etkilediğini göstermektedir.
- Diğer mekanik bulgulara paralel olarak ahşap malzemenin rutubet miktarının Kİ sıcaklığına göre BS değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmüştür.
- En yüksek BS değerinin $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kriyojenik işleme maruz kalan HK rutubet miktarına sahip örneklerde ($21,93\text{ N/mm}^2$) görülürken, en düşük BS değerinin yine $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kriyojenik işleme gören SD rutubet miktarına sahip örneklerde ($15,94\text{ N/mm}^2$) olduğu görülmüştür.
- Kriyojenik işlem sıcaklığına göre en yüksek BS ortalamasının ($19,55\text{ N/mm}^2$) $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de Kİ uygulanan örneklerden elde edildiği, rutubet miktarlarına göre ise, en yüksek ortalamanın HK rutubet miktarına sahip ($21,58\text{ N/mm}^2$) örneklerde olduğu görülmüştür.
- Kriyojenik işlemin ağaç malzeme BS değeri üzerindeki etkisi ise, kontrol grupları ile kriyojenik işleme maruz bırakılan BS değerlerin kıyaslanması ile belirlenmiştir. Bu kıyaslama neticesinde $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %11,7, LD örneklerde %7,5 oranında bir iyileşme olduğu ve SD örneklerde ise %11,8'lik bir kayıp olduğu gözlenmiştir. $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %11,2, LD örneklerde %3,9 oranında bir iyileşme olduğu ve SD örneklerde ise %10,6 oranında bir kayıp olduğu gözlenmiştir. Son olarak $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ Kİ sıcaklığına maruz bırakılmış HK örneklerde %7 oranında bir iyileşme olduğu, LD örneklerde kayda değer bir değişim olmadığı ve SD örneklerde ise %9 oranında bir kayıp olduğu gözlenmiştir.
- Brinell sertlik değerleri için gerçekleştirilen ANOVA sonuçlarına göre BS

üzerinde en etkili parametrenin %96,75 oranıyla RM olduğu ve kriyojenik işlemin ise %1,14 gibi bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

- Örneklerin BS üzerinde Kİ (0,421) faktörü istatistiksel olarak anlamsız ($P > 0,05$), RM (0) faktörü ise istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür ($P \leq 0,05$).
- Brinell sertlik değerleri için gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçlarına göre, bağımlı değişken olan Brinell sertlik değerinin belirlenmesinde bağımsız değişkenlerin (Kİ ve RM) doğru tahmin edildiği ve Brinell sertlik değerindeki değişimi yaklaşık %97 oranında açıkladığı anlaşılmıştır.
- BS değerleri için %95 güven aralığı dikkate alınarak yapılan doğrulama deneyleri sonuçlara göre tahmin hatası (optimum değerler için, %0,4, rastgele değerler için %9) küçük çıkmış ($< \%20$) bu durumun BS deneylerine Taguchi metodunun başarılı bir şekilde uygulandığını göstermiştir.

Bütün mekanik özelliklerde hava kurusu rutubet miktarına sahip örneklerin belirgin bir şekilde iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Her ne kadar tüm örnekler kriyojenik işlem sonrası %12 rutubet miktarına kondisyonlanarak deneyler yapılırsa da malzemenin kriyojenik işlem öncesi taşıdığı rutubet miktarı nedeniyle mekanik özelliklerin olumsuz etkilendiği düşünülmektedir.

8.7. ÖNERİLER

- Çalışma sonucunda elde edilen bulgulara göre, kriyojenik işlemin uygulanması ağaç malzemenin mekanik özelliklerinde artışlara neden olmasına rağmen, kriyojenik işlemin ağaç malzeme mekanik özelliklerini artırmada bir modifikasyon yöntemi olarak kullanılması için yeterli görülmemektedir. Bu doğrultuda benzer çalışmaların farklı ağaç türleri, farklı kriyojenik işlem sıcaklıkları ve süreleri dikkate alınarak ileri aşamalarda yapılması önerilmektedir.
- Farklı rutubet miktarına sahip ağaç malzemeye uygulanan kriyojenik işlemin ağaç malzeme mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması amacı ile ağaç malzemeleri işlem sonrası mikro yapılarındaki değişimin incelenmesi faydalı olacaktır.

9. KAYNAKLAR

- [1] A. Şenel, “Ağaç malzemenin kurutmaya etki eden özellikleri”, *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi*, c. 1, sayı 1, ss. 63–64, 1993.
- [2] A. Kasal, “Masif ve kompozit ağaç malzemelerden üretilmiş çerçeve konstrüksiyonlu koltukların performansı”, Doktora tezi, Mobilya ve Dekorasyon Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2004.
- [3] A. J. Stamm, “Thermal degradation of wood and cellulose”, *Industrial & Engineering Chemistry*, c. 14, sayı 1, ss. 4–36, 1982.
- [4] D. W. Green, J. W. Evans, J. D. Logan and W. J. Nelson, “Adjusting modulus of elasticity of lumber for changes in temperature”, *Forest Products Journal*, c. 49, sayı 10, ss. 82–94, 1999.
- [5] C. C. Gerhards, “Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects”, *Wood and Fiber*, c. 14, sayı 1, ss. 4–36, 1982.
- [6] J. E. Reeb, “Wood and moisture relationships”, *Oregon State University Extension Service*, ss. 1–7, 2009.
- [7] V. A. Schneider and H. Rusche, “Sorption-behaviour of beech- and sprucewood after heat treatments in air and in absence of air”, *Holz als Roh - und Werkstoff*, c. 31, ss. 377–386, 1973.
- [8] A. R. Uluata, *Ağaç Malzemenin Mekanik Özelliklerine Etki Eden Faktörler*, Erzurum, Türkiye: Atatürk Üniversitesi, 1965.
- [9] M. Boonstra, “A two-stage thermal modification of wood”, Ph.D. dissertation Gent University, Gent, Belgium 2008.
- [10] G. K. Demirel ve A. Temiz, “Ahşap korumada çevre dostu modifikasyon yöntemleri”, 3. *Ulusal Mobilya Kongresi*, Konya, Türkiye, 2015, ss. 1018–1020.
- [11] E. Dizman Tomak, “Kimyasal modifikasyonun kızılâğaç ve ladin yonga levhalarında fiziksel, mekanik ve biyolojik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans tezi, Orman Endüstri Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2005.
- [12] C. A. S. Hill, *Wood Modification: Chemical, Thermal And Other Processes*. 1. baskı, Chichester, England: John Wiley & Sons, 2006, ss. 1-239.
- [13] L. Zhao, J. Lu, Y. Zhou and J. Jiang, “Effect of low temperature cyclic treatments on modulus of elasticity of birch wood”, *BioResources*, c. 10, sayı 2, ss. 2318–2327, 2015.
- [14] K. Ramazan, “Ağaç malzemenin rutubeti ve ölçülmesi”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 36, sayı 2, ss. 58–59, 1986.
- [15] S. Ayan ve H. H. Ciritcioğlu, “Isıl işlemin ahşap lamine panellerin bazı fiziksel özellikleri ve vida tutma dayanımına etkisinin belirlenmesi”, *Düzce Üniversitesi İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 1, sayı 1, ss. 35–46, 2012.
- [16] S. Korkut ve D. Kocaefe, “Isıl işlemin odun özellikleri üzerine etkisi”, *Düzce Üniversitesi Ormanlık Dergisi*, c. 5, sayı 2, ss. 11–34, 2009.

- [17] S. Yıldız, “Isıl işlem uygulanan doğu kayını ve doğu ladini odunlarının fiziksel, mekanik, teknolojik ve kimyasal özellikleri”, Doktora tezi, Orman Endüstri Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2002.
- [18] E. Sancar, “Isıl işlem uygulanmış sarıçam odununun bazı fiziksel mekanik ve biyolojik özellikleri”, Yüksek lisans tezi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye, 2016.
- [19] G. D. Kendera and J. Cortez, “Cryogenically treated wooden baseball bat” USA Patent US 2010/0307170 A1”, 9 December 2010.
- [20] R. Radebaugh, “Cryogenics”, *The Macmillan Encyclopedia Of Chemistry*, New York, USA; Springer, 2002, ss. 1–3
- [21] D. Senthilkumar, “Cryogenic treatment: shallow and deep”, *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*, ss. 995–1007, 2016.
- [22] A. Akhbarizadeh, A. Shafyei and M. A. Golozar, “Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel”, *Materials and Design*, c. 30, sayı 8, ss. 3259–3264, 2009.
- [23] J. Y. Huang, Y. T. Zhu, X. Z. Liao, I. J. Beyerlein, M. A. Bourke and T. E. Mitchell, “Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel”, *Materials Science and Engineering*, c. 339, sayı 1–2, ss. 241–244, 2003.
- [24] T. Kıvrak, “Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Ti-6Al-4V alaşımının delinebilirliği üzerindeki etkilerinin araştırılması”, Doktora tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [25] Y. Arslan, “Kriyojenik işlemin AISI D3 soğuk iş takım çeliğinin performansına etkilerinin incelenmesi”, Doktora tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.
- [26] E. Demir, “Investigation of the effects of holding times at cryogenic temperatures on residual stress distribution of aisi D2 tool steel”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.
- [27] M. Kabalak, “Derin kriyojenik işlemin AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin işlenebilirliğine etkisi”, Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2017.
- [28] C. M. Akın, “Kriyojenik işlemin vermiküler grafitli dökme demirin aşınma davranışına etkisi”, Yüksek lisans tezi, Metalurji Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2015.
- [29] S. Morkavuk, “Karbon fiber takviyeli plastiklerin kuru ve kriyojenik işleme koşullarında frezelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2016.
- [30] N. Ayrılmış, U. Büyüksarı ve N. As, “Bending strength and modulus of elasticity of wood-based panels at cold and moderate temperatures”, *Cold Regions Science and Technology*, c. 63, sayı 1–2, ss. 40–43, 2010.
- [31] J. Jiang, J. Lu, Y. Zhou, Y. Zhao and L. Zhao, “Compression strength and modulus of elasticity parallel to the grain of oak wood at ultra-low and high temperatures”, *BioResources*, c. 9, sayı 2, ss. 3571–3579, 2014.

- [32] S. Gao, X. Wang and L. Wang, “Modeling temperature effect on dynamic modulus of elasticity of red pine (*Pinus resinosa*) in frozen and non-frozen states”, *Holzforschung*, c. 69, sayı 2, ss. 233–240, 2015.
- [33] L. Zhao, J. Jiang, J. Lu and T. Zhan, “Flexural property of wood in low temperature environment”, *Cold Regions Science and Technology*, c. 116, ss. 65–69, 2015.
- [34] H. Pelit, “Ağaç malzeme rutubet miktarının su bazlı vernik katman özelliklerine etkisi”, Yüksek lisans tezi, Mobilya Dekorasyon Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [35] R. Katay, “Ağaç malzemenin rutubeti ve ölçülmesi”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 36, sayı 2, ss. 58–59, 1986.
- [36] B. Güller, “Değişik aralama derecelerinin kızılçamda (*Pinus brutia ten.*) odun-su ilişkileri üzerine etkisi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 1, sayı 11, ss. 29–37, 2007.
- [37] G. Ulutay, S. Korkut ve N. Çakıcıer, “Türkiye’de ısı işlemin ağaç malzeme üzerine etkisi konusunda yapılan çalışmaların değerlendirilmesi”, *Düzce Üniversitesi Ormanlık Dergisi*, c. 10, sayı 1, ss. 37–47, 2014.
- [38] N. Yılğör, “Sıcaklığın odun kimyasal bileşenleri üzerine etkileri”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 49, sayı 3, ss. 77–82, 1999.
- [39] W. Homan, B. Tjeerdsma, E. Beckers and A. Jorissen “Structural and other properties of modified wood”, *Congress WCTE*, ss. 3.5.1-1-3.5.1-8, 2000.
- [40] E. Dizman Tomak ve C. Yıldız, “Odunun kimyasal modifikasyonu”, içinde *III. Ulusal Karadeniz Ormanlık Kongresi*, Artvin, Türkiye, 2010, ss. 1681–1690.
- [41] H. Wikberg, “Advanced solid state NMR spectroscopic techniques in the study of thermally modified wood”, Master thesis, Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Helsinki, Helsinki, Finland, 2005.
- [42] International ThermoWood Association, *ThermoWood Handbook*. 1. baskı, Helsinki, Finland: Association Finnish Thermowood, 2003, ss. 5-66
- [43] K. D. Timmerhaus and R. P. Reed (Eds.), *Cryogenic Engineering: Fifty Years Of Progress*, 1. baskı, Madison, USA: Springer-Verlag New York, 2007, ss. 1-374.
- [44] A. Freiman, “History of cryotherapy, dermatology online journal”, *Dermatology Online Journal*, c. 11, sayı 2, ss. 1, 2005.
- [45] Cryogenic Society of America. (2019, 23 Eylül). *CSA, “History of cryogenics: A cryo central resource from the CSA*. Erişim: https://cryogenicsociety.org/resources/cryo_central/history_of_cryogenics/.
- [46] İlk Buzdolabının Yapılış Tarihi. (2019, 23 Eylül). *1900’lü yılların başında evlerde kullanılan buzdolabı.jpeg* Erişim: <https://ilkbuzdolabi.files.wordpress.com/2014/12/oude-koelkast.jpeg>.
- [47] S. W. Van Sciver, *Helium Cryogenics (Second Edition)*, 2. baskı, Florida, USA: Springer Science & Business Media, 2012, ss. 3-75.
- [48] A. Çiçek, F. Kara, T. Kıvak ve E. Ekici, “Evaluation of machinability of hardened and cryo-treated AISI H13 hot work tool steel with ceramic inserts”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, c. 41, ss. 461–469, 2013.
- [49] S. Kalia, “Cryogenic processing: A study of materials at low temperatures”,

Journal of Low Temperature Physics, c. 158, sayı 5–6, ss. 934–945, 2010.

- [50] G. Linde. (2019, 23 Şubat). *Sub-zero treatment of steels*. Special Edition. Erişim: http://www.lindegas.com/en/processes/heat_treatment/sub_zero_treatment/index.html.
- [51] B. Uluğ, “Sıfırtı kreojenik ısıtıl işlemin 100Cr6 ve 8620 kalite çeliklerin özellikleri üzerine etkisi”, Yüksek lisans tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [52] D. H. Besterfield, C. Besterfield, G. H. Besterfield and M. Besterfield, *Total quality management*. 1. baskı, New Jersey, Canada: Prentice Hall Inc., 1995, ss. 1-55.
- [53] M. Lunani, V. N. Nair and G. S. Wasserman, “Graphical methods for robust design with dynamic characteristics”, *Journal of Quality Technology*, c. 29, ss. 327–338, 2018.
- [54] B. Gökçe ve S. Taşgetiren, “Kalite için deney tasarımı”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, c. 6, sayı 1, ss. 71–83, 2009.
- [55] M. Şirvancı, *Kalite İçin Deney Tasarımı “Taguchi Yaklaşımı”*, İstanbul, Türkiye: Literatür Yayıncılık, 1997.
- [56] D. C. Montgomery, *Design And Analysis Of Experiment*, 5. baskı, New York, USA: John Wiley & Sons, 2009, ss. 3-699.
- [57] E. Canyılmaz ve F. Kutay, “Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 18, sayı 3, ss. 51–63, 2003.
- [58] Y. Kandemir, “Kompozit malzemelerin enerji sönümlenme performansına numune ve tetikleyici geometrik değişkenlerin etkisinin taguchi metodu ile incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Otomotiv Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2018.
- [59] Ş. Kasap, “F-4 Uçaklarında yakıt tüketimini etkileyen faktörlerin 2k deneyleri ve taguchi yöntemiyle belirlenmesi”, Yüksek lisans tezi, İstatistik, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2006.
- [60] E. B. Elçioğlu, “Experimental and theoretical investigations on alumina- water nanofluid viscosity with statistical analysis”, Master tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2013.
- [61] K. Tang and J. Tang, “Design of product specifications for multi-characteristic inspection”, *Management Science*, c. 35, sayı 6, ss. 743–755, 1989.
- [62] A. M. Connor, “Parameter sizing for fluid power circuits using taguchi methods”, *Journal of Engineering Design*, c. 10, sayı 4, ss. 377–390, 1999.
- [63] P. J. Ross, *Taguchi Techniques For Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design*, New York, U.S.A.: McGraw – Hill International book company, 1995.
- [64] G. Taguchi, S. Chowdhury and Y. Wu, *Taguchi’s Quality Engineering Handbook*, 1. baskı, Hoboken, New Jersey, Canada: John Wiley & Sons, 2005, ss. 501-617.
- [65] Ş. Alemdağ, Türkiyede sarıçam ormanlarının kuruluşu, verim gücü ve bu ormanların işletilmesinde takip edilecek esaslar. Ankara, Türkiye: Ormancılık

- Araştırma Enstitüsü Yayınları, Teknik Bülten, (20), ss. 1-160.
- [66] S. Arslan, *Ağaç Dendrolojisi, Odun Anatomisi*. Ankara, Türkiye: Ufuk Ofset/Matbaacılık, 1994, ss. 1-151.
- [67] Z. C. Özkan ve A. Rahim, *Tohumlu Bitkiler (Spermatophyta) Odunsu Taksonlar*. Trabzon, Türkiye: Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, 1993, ss. 1-512.
- [68] M. Sevimsoy, “Göle-sarıkamış yöresinde saf sarıçam (*Pinus sylvestris L.*) ormanlarında doğal gençleştirme yöntemlerinin saptanması”, *Ormancılık Araştırma Enstitüsü Yayınları*, ss. 7–48, 1984.
- [69] M. Tetik, “Kuzeydoğu anadolu’daki saf sarıçam (*Pinus sylvestris L.*) ormanlarının ekolojik şartları”, Doktora tezi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 1986.
- [70] A. Y. Bozkurt ve E. N. Yılmaz, *Odun Anatomisi*. İstanbul, Türkiye: İ.Ü. Orman Fakültesi Yayınları, 2000, ss. 1-346.
- [71] *Odunda fiziksel ve mekaniksel deneyler için numune alma metotları ve genel özellikler*, Türk Standartlar Enstitüsü TS 2470, 1976.
- [72] *Oduna, fiziksel ve mekaniksel deneyler için birim hacim ağırlığı tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü TS 2472, 1976.
- [73] *Odunun statik eğilme dayanımının tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü TS 2474, 1976.
- [74] *Odunun statik eğilmede elastikiyet modülünün tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü TS 2478, 2014.
- [75] *Odunda liflere paralel doğrultuda makaslama dayanımının tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü TS 3459, 1980.
- [76] *Odunun liflere paralel doğrultuda basınç dayanımının tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü TS 2595, 1977.
- [77] *Odunda liflere paralel doğrultuda çekme gerilmesinin tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü TS 2475, 1976.
- [78] *Odunun statik sertliğinin tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü TS 2479, 1976.
- [79] W. Zhou, “Effect of temperature on MOE and MOR of structural panels”, Master thesis, Forest Products, Oregon State University, Oregon, USA, 1989.
- [80] A. Y. Bozkurt, “Ağaç malzemenin mekanik özellikleri”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 2, sayı 16, ss. 40-60–60, 1966.
- [81] A. Özcifçi, S. Altun, ve F. Yapıcı, “Isıl işlem uygulamasının ağaç malzemenin teknolojik özelliklerine etkisi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*. Karabük, Türkiye, 2009, ss. 1–5.
- [82] Ş. Doruk ve O. Perçin, “Isıl işlemin bazı ağaç malzemelerin eğilme ve basınç direncine etkileri”, *Politeknik Dergisi*, c. 13, sayı 2, ss. 143–150, 2010.
- [83] R. Çakıroğlu, “Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan sıcaklığın modellenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [84] H. Yurtkuran, “DIN 1.2344 çeliğinin tornalanmasında oluşan kesme kuvvetleri ve

yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2013.

- [85] A. Arı ve H. Önder, “Farklı veri yapılarında kullanılabilecek regresyon yöntemleri”, *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, c. 28, sayı 3, ss. 168–174, 2013.
- [86] G. Samtaş ve S. Korucu, “Temperlenmiş alüminyum 5754 alaşımının frezelenmesinde kesme parametrelerinin Taguchi metodu kullanılarak optimizasyonu”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 7, ss. 45–60, 2019.
- [87] F. Kara ve B. Öztürk, “Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard-machining of DIN 1.2738 mold steel”, *Sensor Review*, c. 39, sayı 1, ss. 24–33, Oca. 2019.
- [88] S. Korkut, M. Akgül, ve T. Dünder, “The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood”, *Bioresource Technology*, c. 99, sayı 6, ss. 1861–1868, 2008.
- [89] B. C. Bal ve E. Akçakaya, “Isıl işlem görmüş çam odunun bazı fiziksel özellikleri ve sertlik değerleri” *International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Adana, Türkiye, 2016, ss. 1523–1529.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Ersin PAMUKCU
Doğum Tarihi ve Yeri :01.01.1982-Pertek
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta :ersin-pamukcu@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Ağaç İşleri Endüstri Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Mobilya ve Dekorasyon Öğrt.	Zonguldak Karaelmas Üniversitesi	2009
Lise	Elektrik	Küçükköy Endüstri Meslek Lisesi	1999

YAYINLAR

H. H. Ciritcioğlu ve E. Pamukcu “Sığ Kriyojenik İşlemin Ahşabın Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması”, *3rd International Engineering Research Symposium*, yayımlanmak üzere gönderildi, 2019.