

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**CLT ÜRETİMİ İÇİN KERESTE KALİTE VE DİRENÇ SINIFI OPTİMİZASYON MODELİ  
GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Abdullah Uğur BİRİNCİ**

**MART 2025  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**CLT ÜRETİMİ İÇİN KERESTE KALİTE VE DİRENÇ SINIFI OPTİMİZASYON MODELİ  
GELİŞTİRİLMESİ**

**Abdullah Uğur BİRİNCİ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"DOKTOR (ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 / 02 / 2025**

**Tezin Savunma Tarihi : 06 / 03 / 2025**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Cenk DEMİRKİR**

**Trabzon 2025**

## ÖNSÖZ

“CLT Üretimi İçin Kereste Kalite ve Direnç Sınıfı Optimizasyon Modeli Geliştirilmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Cenk DEMİRKİR’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Gürsel ÇOLAKOĞLU’na, Prof. Dr. Semra ÇOLAK’a, Prof. Dr. İsmail AYDIN’a, Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’a, Prof. Dr. Engin Derya GEZER’e, Prof. Dr. Şükrü ÖZŞAHİN’e, Doç. Dr. Aydın DEMİR’e, Doç. Dr. Hasan ÖZTÜRK’e, Dr. Öğr. Üyesi Fatih Yesevi OKUR’a, Öğr. Gör. Dr. Fezayil SUNCA’ya, Dr. Ali ÇAKMAK’a ve eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan değerli arkadaşlarım Yüksek Mühendis Okan İLHAN’a, Yüksek Mühendis Algihan Kaşif KARAHASAN’a ve Makine Teknikeri Mustafa KARAKAŞ’a teşekkürü bir borç bilirim. Bugünlere ulaşmamda bana her türlü maddi ve manevi desteği veren kıymetli eşim Tuğba BİRİNCİ ve aileme de müteşekkir olduğumu belirtmek isterim.

Bu tez TÜBİTAK 220O012 nolu projenin sağladığı destekle tamamlanmış olup, TÜBİTAK’a teşekkür ederim. Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Abdullah Uğur BİRİNCİ

Trabzon 2025

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “CLT Üretimi İçin Kereste Kalite ve Direnç Sınıfı Optimizasyon Modeli Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Cenk DEMİRKİR’ ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/03/2025

Abdullah Uğur BİRİNCİ

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ÖNSÖZ.....                                                                                                     | III             |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....                                                                                      | IV              |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                                               | V               |
| ÖZET .....                                                                                                     | IX              |
| SUMMARY .....                                                                                                  | X               |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                                                           | XI              |
| TABLolar DİZİNİ.....                                                                                           | XIV             |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                                                                          | XIX             |
| 1. GENEL BİLGİLER .....                                                                                        | 1               |
| 1.1. Ahşap Yapılar.....                                                                                        | 2               |
| 1.2. Yüksek Katlı Ahşap Yapılar.....                                                                           | 3               |
| 1.2.1. Yüksek Katlı Ahşap Yapılarda Kullanılan Ahşap Mühendislik Ürünleri .....                                | 4               |
| 1.3. Çapraz Lamine Ahşap (CLT) .....                                                                           | 9               |
| 1.3.1. CLT'nin Faydaları.....                                                                                  | 10              |
| 1.3.2. CLT Maliyetini Etkileyen Faktörler .....                                                                | 14              |
| 1.3.3. CLT Üretimi.....                                                                                        | 15              |
| 1.3.4. CLT Üretiminde Kullanılan Ağaç Türleri ve Hammadde Özellikleri.....                                     | 16              |
| 1.3.5. CLT Üretiminde Kullanılan Tutkal Türleri .....                                                          | 16              |
| 1.4. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) .....                                                                 | 18              |
| 1.5. Kalite ve Direnç Sınıflarına Göre Kereste Sınıflandırması.....                                            | 20              |
| 1.6. Tahribatsız Yöntemlerle Belirlenen CLT Panellerin Teknolojik Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar ..... | 22              |
| 2. GEREÇ VE YÖNTEM.....                                                                                        | 26              |
| 2.1. Materyal.....                                                                                             | 26              |
| 2.1.1. Ağaç Malzeme .....                                                                                      | 26              |
| 2.1.2. Tutkal .....                                                                                            | 27              |
| 2.2. Kereste Kalite Sınıflarının Belirlenmesi İş Akışı.....                                                    | 28              |
| 2.2.1. Kerestelerin Boyutlandırılması ve Rutubet Kontrolü .....                                                | 29              |
| 2.3. Kerestelerin Test Edilmesi .....                                                                          | 29              |

|        |                                                                                                                          |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.1. | Kerestelerin Tahribatsız Rutubet Tayini .....                                                                            | 30 |
| 2.3.2. | Kerestelerin Tahribatsız Vida Tutma/Çekme ve Makaslama Modülü Direncinin Belirlenmesi .....                              | 30 |
| 2.3.3. | Kerestelerin Tahribatsız Akustik Yöntem ile Test Edilmesi .....                                                          | 31 |
| 2.3.4. | Kerestelerin Tahribatlı Yoğunluk, Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülünün Belirlenmesi.....                              | 32 |
| 2.3.5. | Kerestelerin Tahribatlı Liflere Paralel Basınç Direnci ve Makaslama Direncinin Belirlenmesi.....                         | 32 |
| 2.3.6. | TS EN 338'e Göre Direnç Sınıflandırması, Tahribatlı ve Tahribatsız Testlere Ait Sonuçların Analizi ve Kalibrasyonu ..... | 32 |
| 2.4.   | Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Üretimi.....                                                                                   | 34 |
| 2.4.1. | Tutkallama ve Taslak Oluşturma .....                                                                                     | 35 |
| 2.4.2. | Presleme .....                                                                                                           | 35 |
| 2.5.   | CLT Panellerin Test Edilmesi .....                                                                                       | 37 |
| 2.5.1. | CLT Panellerin Tahribatlı Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi .....                                          | 37 |
| 2.5.2. | CLT Panellerin Tahribatsız Yöntemler ile Test Edilmesi.....                                                              | 38 |
| 2.6.   | CLT Duvarlar Üzerine Gerçekleştirilen Perde Duvar Analiz Testi .....                                                     | 39 |
| 2.7.   | SAP 2000 Programı ile Perde Duvar Analizi.....                                                                           | 41 |
| 2.8.   | Yapay Sinir Ağları (YSA) Modellemesi .....                                                                               | 49 |
| 3.     | BULGULAR.....                                                                                                            | 54 |
| 3.1.   | CLT Üretiminde Kullanılan Kerestelere Ait Bulgular .....                                                                 | 54 |
| 3.1.1. | Tahribatsız Rutubet Tayinine Ait Bulgular.....                                                                           | 54 |
| 3.1.2. | Tahribatsız Vida Tutma/Çekme ve Makaslama Modülü Direncine Ait Bulgular.....                                             | 55 |
| 3.1.3. | Tahribatsız Yoğunluk, Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Bulgular.....                                           | 57 |
| 3.1.4. | Tahribatlı Yoğunluk ve Basınç Direncine Ait Bulgular .....                                                               | 59 |
| 3.1.5. | Tahribatlı Makaslama Direnci, Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Bulgular .....                                  | 61 |
| 3.2.   | CLT Panellere Ait Bulgular .....                                                                                         | 64 |
| 3.2.1. | CLT Panellerin Tahribatsız Rutubet ve Yoğunluk Testlerine Ait Bulgular.....                                              | 64 |
| 3.2.2. | CLT Panellerin Tahribatsız Vida Tutma/Çekme Direnci ve Makaslama Modülü Direncine Ait Bulgular.....                      | 67 |
| 3.2.3. | CLT Panellerin Tahribatsız Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Bulgular .....                                     | 69 |

|        |                                                                                                                 |     |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.4. | CLT Panellerin Tahribatlı Yoğunluk ve Liflere Paralel Makaslama Direncine Ait Bulgular .....                    | 71  |
| 3.2.5. | CLT Panellerin Tahribatlı Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Bulgular .....                             | 74  |
| 3.3.   | CLT Duvarlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylere Ait Bulgular .....                                             | 76  |
| 3.4.   | SAP 2000 Analizlerine Ait Bulgular .....                                                                        | 83  |
| 3.5.   | Yapay Sinir Ağları Analizlerine Ait Bulgular .....                                                              | 85  |
| 4.     | TARTIŞMA .....                                                                                                  | 91  |
| 4.1.   | CLT Üretiminde Kullanılan Kerestelere Ait Tartışma .....                                                        | 91  |
| 4.1.1. | Tahribatlı Yoğunluk Testlerine Ait Tartışma .....                                                               | 91  |
| 4.1.2. | Tahribatlı Makaslama Direnci ve Basınç Direncine Ait Tartışma .....                                             | 92  |
| 4.1.3. | Tahribatlı Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Tartışma .....                                            | 93  |
| 4.2.   | CLT Üretiminde Kullanılan Kerestelerin Tahribatlı ve Tahribatsız Test Sonuçlarına Ait Regrasyon Modelleri ..... | 95  |
| 4.3.   | CLT Panellere Ait Tartışma .....                                                                                | 98  |
| 4.3.1. | CLT Panellerin Yoğunluk ve Rutubet Değerlerine Ait Tartışma .....                                               | 98  |
| 4.3.2. | CLT Panellerin Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülü Değerlerine Ait Tartışma .....                              | 99  |
| 4.3.3. | CLT Panellerin Liflere Paralel Makaslama Direnci Değerlerine Ait Tartışma .....                                 | 102 |
| 4.3.4. | CLT Panellere Ait Regresyon Modelleri .....                                                                     | 103 |
| 4.4.   | CLT Duvarlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylere Ait Tartışma .....                                             | 106 |
| 4.5.   | SAP 2000 Analizlerine Ait Tartışma .....                                                                        | 110 |
| 4.6.   | Yapay Sinir Ağları Analizlerine Ait Tartışma .....                                                              | 113 |
| 5.     | SONUÇLAR .....                                                                                                  | 123 |
| 5.1.   | CLT Üretiminde Kullanılan Kerestelere Ait Sonuçlar .....                                                        | 123 |
| 5.1.1. | Tahribatsız Rutubet Tayinine Ait Sonuçlar .....                                                                 | 123 |
| 5.1.2. | Tahribatsız Vida Tutma/Çekme ve Makaslama Direncine Ait Sonuçlar .....                                          | 123 |
| 5.1.3. | Tahribatsız Yoğunluk, Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülü Ait Sonuçlar .....                                   | 123 |
| 5.1.4. | Tahribatlı Yoğunluk ve Basınç Direncine Ait Sonuçlar .....                                                      | 124 |
| 5.1.5. | Tahribatlı Makaslama Direnci, Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Sonuçlar .....                         | 124 |
| 5.2.   | CLT Panellere Ait Sonuçlar .....                                                                                | 125 |
| 5.2.1. | Tahribatsız Rutubet ve Yoğunluk Testlerine Ait Sonuçlar .....                                                   | 125 |

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.2. Tahribatsız Vida Tutma/Çekme Direnci ve Makaslama Direncine Ait Sonuçlar ..... | 125 |
| 5.2.3. Tahribatsız Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Sonuçlar .....          | 126 |
| 5.2.4. Tahribatlı Yoğunluk ve Liflere Paralel Makaslama Direncine Ait Sonuçlar .....  | 126 |
| 5.2.5. Tahribatlı Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Sonuçlar.....            | 127 |
| 5.3. CLT Duvarlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylere Ait Sonuçlar .....              | 128 |
| 5.4. SAP 2000 Analizlerine Ait Sonuçlar.....                                          | 128 |
| 5.5. Yapay Sinir Ağları Analizlerine Ait Sonuçlar .....                               | 129 |
| 6. ÖNERİLER.....                                                                      | 131 |
| 7. KAYNAKLAR .....                                                                    | 133 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                              |     |

Doktora Tezi

## ÖZET

### CLT ÜRETİMİ İÇİN KERESTE KALİTE VE DİRENÇ SINIFI OPTİMİZASYON MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

Abdullah Uğur BİRİNCİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Cenk DEMİRKİR  
2025, 153 Sayfa

Çalışma kapsamında ağaç türü olarak ladin ve kızılğaç türlerine ait keresteler kullanılmıştır. Keresteler TS EN 384+A2 standardına göre tahribatlı yöntemler ve çalışma amacına uygun olarak tahribatsız test yöntemleri ile test edilmiştir. Temin edilen keresteler TS EN 338 standardına göre sınıflandırılmıştır. Sınıflandırılmış keresteler kullanılarak 60 adet 120-240x240x7,5cm ebatlarında CLT panel üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen CLT panellerin teknolojik özellikleri TS EN 408+A1 ve ASTM E 72 standartlarına göre test edilmiştir. Yapısal olarak test edilen CLT duvarlar SAP 2000 programı kullanılarak modellenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ile SAP 2000 programında yapılan sonlu eleman modelleri ve deneysel modal analiz sonuçları birbirleriyle uyumlu bulunmuştur. Ayrıca YSA ile CLT üretimi için optimum kereste kalitesi ve direnç sınıfının ortaya koyan bir optimizasyon modeli kurulmuştur.

Bu çalışma ile yerli CLT üretimi için malzeme bazında optimum üretim şartların ortaya koyulduğu bir model oluşturularak ilgili sektör ve akademik paydaşların kullanımına sunulmuştur. Bu çalışmada elde edilen veriler doğrultusunda, bundan sonraki çalışmalarda yüksek katlı bir CLT ahşap yapının bire bir ölçekte inşa edilerek deprem ve yangın koşullarındaki performansının belirlenmesi önerilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** CLT (Çapraz Lamine Ahşap), Kereste Kalitesi, Tahribatsız Test Yöntemleri, SAP 2000, Optimizasyon.

PhD. Thesis

## SUMMARY

### DEVELOPMENT OF TIMBER QUALITY AND STRENGTH CLASS OPTIMIZATION MODEL FOR CLT PRODUCTION

Abdullah Uğur BİRİNCİ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Forest Industry Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Cenk DEMİRKİR  
2025, 153 Pages

Within the scope of the study, timber of spruce and alder species were used as tree species. The timbers were tested with damaged methods according to TS EN 384+A2 standard and with non-damaged test methods in accordance with the study purpose. The supplied timber was classified according to TS EN 338 standard. 60 CLT panels with dimensions of 120-240x240x7,5cm were produced using classified timbers. The technological properties of the CLT panels produced have been tested according to TS EN 408+A1 and ASTM E 72 standards. Structurally tested CLT walls were modeled using the SAP 2000 program. With the experimental studies carried out, the results of the finite element models and experimental modal analysis made in the SAP 2000 program were found to be compatible with each other. In addition, an optimization model was established with ANN to reveal the optimum timber quality and resistance class for CLT production.

With this study, a model revealing optimum production conditions on a material basis for domestic CLT production was created and made available to the relevant industry and academic stakeholders. For future studies, it is recommended to build a high-rise CLT wooden structure on a one-to-one scale and determine its performance during earthquakes and fires, in the light of the data obtained from this study.

**Key Words:** CLT (Cross Laminated Timber), Timber quality, Non-Destructive test methods, SAP 2000, Optimization

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                             | <u>Sayfa No</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 1. Yüksek katlı ahşap yapı örnekleri (URL-1, 2025) .....                                                              | 6               |
| Şekil 2. Çivili Lamine Ahşap (NLT) (StructureCraft, 2019a). ....                                                            | 7               |
| Şekil 3. Dübel-Lamine Ahşap (DLT) (StructureCraft, 2019b). ....                                                             | 8               |
| Şekil 4. Yapıştırılmış Lamine Ahşap (Glulam) .....                                                                          | 9               |
| Şekil 5. Çapraz Lamine Ahşap (CLT) .....                                                                                    | 10              |
| Şekil 6. CLT üretim akış şeması (Demir vd., 2024). ....                                                                     | 15              |
| Şekil 7. Kereste kalite sınıflarının belirlenmesi iş akışı.....                                                             | 28              |
| Şekil 8. Tahribatsız vida tutma/çekme direnç ölçer (Fakopp, 2024). ....                                                     | 31              |
| Şekil 9. Akustik test cihazı yazılım verileri .....                                                                         | 32              |
| Şekil 10. Tutkal sürme merdanesi.....                                                                                       | 35              |
| Şekil 11. CLT panel taslak oluşturma ve enine kesit.....                                                                    | 35              |
| Şekil 12. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülünün ölçümü için deney düzeneği (TS EN 408+A1, 2014). ....            | 37              |
| Şekil 13. a) Çelik plâkalara yapıştırılmış kereste deney parçasının görünüşü b) Yükleme düzeneği (TS EN 408+A1, 2014). .... | 38              |
| Şekil 14. DeneySEL test düzeneği şematik gösterimi.....                                                                     | 40              |
| Şekil 15. LVDT'lerin yerleştirildiği düğüm noktaları .....                                                                  | 40              |
| Şekil 16. Test sonucu elde edilen grafik (Pirvu, 2008). ....                                                                | 41              |
| Şekil 17. B&K 4506 tipi üç eksenli ivme ölçer .....                                                                         | 42              |
| Şekil 18. B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi .....                                                             | 43              |
| Şekil 19. Dinamik karakteristiklerinin deneySEL yöntemlerle belirlenmesine ait akış şeması .....                            | 44              |
| Şekil 20. CLT duvarlara ait ivme ölçerlerin yerleşimi .....                                                                 | 44              |
| Şekil 21. 3 numaralı gruba ait CLT duvarın tahribatsız durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri .....           | 45              |
| Şekil 22. 16 numaralı gruba ait CLT duvarın tahribatsız durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri .....          | 45              |
| Şekil 23. 19 numaralı gruba ait CLT duvarın tahribatsız durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri .....          | 46              |
| Şekil 24. CLT duvarlarla elde edilen mod şekillerine ait görsel; (a) 1. Mod ve (b) 2. Mod.....                              | 46              |
| Şekil 25. CLT duvar modellerine ait ortak sonlu eleman modeli detayları ve görünüşleri .....                                | 47              |

|           |                                                                                                                             |     |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 26. | Link eleman özellikleri .....                                                                                               | 48  |
| Şekil 27. | CLT duvarlara ait SAP 2000 programından elde edilen mod şekilleri .....                                                     | 49  |
| Şekil 28. | Eğilme direnci tahmin modeli olarak seçilen YSA mimarisi .....                                                              | 51  |
| Şekil 29. | Elastikiyet Modülü tahmin modeli olarak seçilen YSA mimarisi .....                                                          | 51  |
| Şekil 30. | Liflere paralel makaslama direnci tahmin modeli olarak seçilen YSA mimarisi .....                                           | 52  |
| Şekil 31. | Rijitlik tahmin modeli olarak seçilen YSA mimarisi .....                                                                    | 52  |
| Şekil 32. | Belirlenen tahmin modellerinin iterasyona bağlı olarak MSE değişimleri .....                                                | 86  |
| Şekil 33. | Kerestelerin direnç sınıflarına göre yoğunluk değerleri değişimleri .....                                                   | 91  |
| Şekil 34. | Kerestelerin direnç sınıflarına göre makaslama direnci ve basınç direnci değerleri değişimleri .....                        | 92  |
| Şekil 35. | Kerestelerin direnç sınıflarına göre eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri değişimleri .....                       | 94  |
| Şekil 36. | Ladin kerestelere ait regresyon grafikleri .....                                                                            | 96  |
| Şekil 37. | Kızılağaç kerestelere ait regresyon grafikleri .....                                                                        | 96  |
| Şekil 38. | Kurulan regresyon modelleriyle hesaplanan elastikiyet modülü değerlerinin tahribatsız yöntemler ile karşılaştırılması ..... | 97  |
| Şekil 39. | Üretilen CLT panellerin yoğunluk ve rutubet değerleri değişimleri .....                                                     | 98  |
| Şekil 40. | Üretilen CLT panellerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri değişimleri .....                                    | 100 |
| Şekil 41. | Üretilen CLT panellerin liflere paralel makaslama direnci değerleri değişimleri .....                                       | 102 |
| Şekil 42. | CLT duvarların maksimum yük ve maksimum yükte deformasyon değerleri değişimleri .....                                       | 106 |
| Şekil 43. | Yanal yük testine maruz kalan CLT duvarların tüm gruplarında en sık rastlanan hasarlar .....                                | 109 |
| Şekil 44. | CLT duvara uygulanan frekans değerlerine ait deneysel ve sonlu eleman analizler arası ilişki .....                          | 110 |
| Şekil 45. | CLT duvara uygulanan yer değiştirmeye ait deneysel ve sonlu eleman analizler arası ilişki .....                             | 111 |
| Şekil 46. | Gerçek veriler ile tahmin verilerinin karşılaştırılması .....                                                               | 113 |
| Şekil 47. | Eğilme direnci ve elastikiyet modülü tahmin modellerine ait regresyon grafikleri .....                                      | 114 |
| Şekil 48. | Liflere paralel makaslama direnci ve rijitlik tahmin modellerine ait regresyon grafikleri .....                             | 115 |
| Şekil 49. | Kereste direnç sınıfına göre CLT paneller için eğilme direnci değerlerinin değişimi .....                                   | 117 |

|           |                                                                                                              |     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 50. | Kereste direnç sınıfına göre CLT paneller için elastikiyet modülü değerlerinin değişimi .....                | 118 |
| Şekil 51. | Kereste direnç sınıfına göre CLT paneller için liflere paralel makaslama direnci değerlerinin değişimi ..... | 119 |
| Şekil 52. | Kereste direnç sınıfına göre CLT paneller için rijitlik değerlerinin değişimi .....                          | 120 |



## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                                                                                                          | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Tablo 1. Keresteler üzerine uygulanan testler için deneme deseni .....                                                                                   | 34                     |
| Tablo 2. Ağaç türü ve kereste kalitesine göre oluşturulan test grupları.....                                                                             | 36                     |
| Tablo 3. CLT panellere uygulanan testler için deneme deseni .....                                                                                        | 39                     |
| Tablo 4. B&K 4506 tipi üç eksenli ivme ölçere ait bazı özellikler.....                                                                                   | 42                     |
| Tablo 5. Kullanılan ahşapların rijitlik özellikleri.....                                                                                                 | 47                     |
| Tablo 6. CLT üretiminde kullanılan kerestelerin tahribatsız olarak tayin edilen ortalama rutubet değerleri.....                                          | 54                     |
| Tablo 7. CLT üretiminde kullanılan kerestelerin tahribatsız olarak tayin edilen ortalama vida tutma/çekme ve makaslama modülü direnci değerleri .....    | 55                     |
| Tablo 8. Tahribatsız yöntemle belirlenen vida tutma/çekme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim.....                   | 55                     |
| Tablo 9. Tahribatsız yöntemle belirlenen vida tutma/çekme direncinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları .....                                 | 56                     |
| Tablo 10. Tahribatsız yöntemle belirlenen makaslama modülü direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim.....                  | 56                     |
| Tablo 11. Tahribatsız yöntemle belirlenen makaslama modülü direncinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları .....                                | 56                     |
| Tablo 12. CLT üretiminde kullanılan kerestelerin tahribatsız olarak tayin edilen ortalama yoğunluk, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri ..... | 57                     |
| Tablo 13. Tahribatsız yöntemle belirlenen yoğunluk verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim .....                                 | 57                     |
| Tablo 14. Tahribatsız yöntemle belirlenen yoğunluk verilerinin SNK (Student Newman-Keuls) yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları .....                | 58                     |
| Tablo 15. Tahribatsız yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim.....                            | 58                     |
| Tablo 16. Tahribatsız yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin SNK (Student Newman-Keuls) yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları .....          | 58                     |
| Tablo 17. Tahribatsız yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim.....                        | 58                     |
| Tablo 18. Tahribatsız yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları .....                             | 59                     |
| Tablo 19. CLT üretiminde kullanılan kerestelerin tahribatlı olarak tayin edilen yoğunluk ve basınç direnci ortalama değerleri.....                       | 59                     |
| Tablo 20. Tahribatlı yöntemle belirlenen yoğunluk verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim .....                                  | 60                     |

|           |                                                                                                                                                          |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 21. | Tahribatlı yöntemle belirlenen yoğunluk SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları .....                                                              | 60 |
| Tablo 22. | Tahribatlı yöntemle belirlenen basınç direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim .....                                      | 60 |
| Tablo 23. | Tahribatlı yöntemle belirlenen basınç direncinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları .....                                                     | 61 |
| Tablo 24. | CLT üretiminde kullanılan tahribatlı olarak tayin edilen ortalama makaslama direnci, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri .....                | 61 |
| Tablo 25. | Tahribatlı yöntemle belirlenen makaslama direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim.....                                    | 62 |
| Tablo 26. | Tahribatlı yöntemle belirlenen makaslama direncinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları .....                                                  | 62 |
| Tablo 27. | Tahribatlı yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim .....                                      | 62 |
| Tablo 28. | Tahribatlı yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları .....                                            | 63 |
| Tablo 29. | Tahribatlı yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim.....                                   | 63 |
| Tablo 30. | Tahribatlı yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları .....                                        | 63 |
| Tablo 31. | CLT panellerin tahribatsız olarak tayin edilen ortalama rutubet, yoğunluk ve SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları değerleri .....               | 65 |
| Tablo 32. | Tahribatsız yöntemle belirlenen rutubet verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim .....                                            | 66 |
| Tablo 33. | Tahribatsız yöntemle belirlenen yoğunluk verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim .....                                           | 66 |
| Tablo 34. | CLT panellerde tahribatsız olarak tayin edilen ortalama vida tutma/çekme, makaslama direnci ve SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grup değerleri ..... | 67 |
| Tablo 35. | Tahribatsız yöntemle belirlenen vida tutma/çekme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim.....                            | 68 |
| Tablo 36. | Tahribatsız yöntemle belirlenen makaslama direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim.....                                   | 68 |
| Tablo 37. | CLT panellerde tahribatsız olarak tayin edilen eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri .....                                                      | 69 |
| Tablo 38. | Tahribatsız yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim.....                                      | 70 |
| Tablo 39. | Tahribatsız yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim.....                                  | 70 |
| Tablo 40. | CLT panellerde tahribatlı olarak tayin edilen yoğunluk ve liflere paralel makaslama direnci ortalama değerlerine ait homojenlik grupları .....           | 72 |

|           |                                                                                                                                        |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 41. | Tahribatlı yöntemle belirlenen yoğunluk verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim .....                          | 73 |
| Tablo 42. | Tahribatlı yöntemle belirlenen liflere paralel makaslama direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim ..... | 73 |
| Tablo 43. | CLT panellerde tahribatlı olarak tayin edilen eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerine ait homojenlik grupları.....            | 74 |
| Tablo 44. | Tahribatlı yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim .....                    | 75 |
| Tablo 45. | Tahribatlı yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim.....                 | 75 |
| Tablo 46. | Perde duvar analizlerinde Grup 1'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                  | 76 |
| Tablo 47. | Perde duvar analizlerinde Grup 2'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                 | 76 |
| Tablo 48. | Perde duvar analizlerinde Grup 3'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                  | 76 |
| Tablo 49. | Perde duvar analizlerinde Grup 4'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                  | 77 |
| Tablo 50. | Perde duvar analizlerinde Grup 5'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                  | 77 |
| Tablo 51. | Perde duvar analizlerinde Grup 6'ya ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                 | 77 |
| Tablo 52. | Perde duvar analizlerinde Grup 7'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                 | 77 |
| Tablo 53. | Perde duvar analizlerinde Grup 8'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                  | 78 |
| Tablo 54. | Perde duvar analizlerinde Grup 9'a ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                  | 78 |
| Tablo 55. | Perde duvar analizlerinde Grup 10'a ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                 | 78 |
| Tablo 56. | Perde duvar analizlerinde Grup 11'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                 | 78 |
| Tablo 57. | Perde duvar analizlerinde Grup 12'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                | 79 |
| Tablo 58. | Perde duvar analizlerinde Grup 13'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                 | 79 |
| Tablo 59. | Perde duvar analizlerinde Grup 14'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                 | 79 |
| Tablo 60. | Perde duvar analizlerinde Grup 15'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....                                                 | 79 |

|           |                                                                                               |    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 61. | Perde duvar analizlerinde Grup 16'ya ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....       | 80 |
| Tablo 62. | Perde duvar analizlerinde Grup 17'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....       | 80 |
| Tablo 63. | Perde duvar analizlerinde Grup 18'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....        | 80 |
| Tablo 64. | Perde duvar analizlerinde Grup 19'a ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....        | 80 |
| Tablo 65. | Perde duvar analizlerinde Grup 20'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....       | 81 |
| Tablo 66. | Perde duvar analizlerinde Grup 21'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....        | 81 |
| Tablo 67. | Perde duvar analizlerinde Grup 22'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....       | 81 |
| Tablo 68. | Perde duvar analizlerinde Grup 23'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....        | 81 |
| Tablo 69. | Perde duvar analizlerinde Grup 24'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....        | 82 |
| Tablo 70. | Perde duvar analizlerinde Grup 25'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....        | 82 |
| Tablo 71. | Perde duvar analizlerinde Grup 26'ya ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....       | 82 |
| Tablo 72. | Perde duvar analizlerinde Grup 27'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....       | 82 |
| Tablo 73. | Perde duvar analizlerinde Grup 28'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....        | 83 |
| Tablo 74. | Perde duvar analizlerinde Grup 29'a ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....        | 83 |
| Tablo 75. | Perde duvar analizlerinde Grup 30'a ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri .....        | 83 |
| Tablo 76. | Modellere ait frekans değerlerinin deneysel ve numerik şekilde karşılaştırılmalı halleri..... | 84 |
| Tablo 77. | Yanal yük testleri sonrası maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması.....                | 85 |
| Tablo 78. | Eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerine ait eğitim ve test verileri.....             | 87 |
| Tablo 79. | Liflere paralel makaslama direnci ve rijitlik değerlerine ait eğitim ve test verileri .....   | 88 |
| Tablo 80. | Eğilme direnci değerlerinin tahmin modelinin bağlantı ağırlıkları ve eşikleri .....           | 89 |

|           |                                                                                                                                |     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 81. | Elastikiyet modülü değerlerinin tahmin modelinin bağlantı ağırlıkları ve eşikleri.....                                         | 89  |
| Tablo 82. | Liflere paralel makaslama direnci değerlerinin tahmin modelinin bağlantı ağırlıkları ve eşikleri .....                         | 90  |
| Tablo 83. | Rijitlik değerlerinin tahmin modelinin bağlantı ağırlıkları ve eşikleri .....                                                  | 90  |
| Tablo 84. | CLT panellerin Tahribatsız ve Tahribatlı testlerine ilişkin belirleme katsayı ( $R^2$ ) değerleri ve regresyon modelleri ..... | 105 |
| Tablo 85. | CLT duvarlarda perde duvar analiz değerleri.....                                                                               | 108 |
| Tablo 86. | Sonlu eleman modelleri ile elde edilen rijitlik.....                                                                           | 112 |
| Tablo 87. | CLT paneller için optimum kereste direnç sınıfı ve tabaka kombinasyonları .....                                                | 121 |



## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|      |                                                                                             |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| CLT  | : Çapraz Lamine Ahşap                                                                       |
| LVL  | : Laminated Veneer Lumber                                                                   |
| PSL  | : Parallel Strand Lumber                                                                    |
| LSL  | : Laminated Strand Lumber                                                                   |
| NLT  | : Nail Laminated Timber, Çivili Lamine Ahşap                                                |
| DLT  | : Dowel Laminated Timber, Dübel-Lamine Ahşap                                                |
| IBC  | : International Building Code, Uluslararası Bina Kodu                                       |
| PRF  | : Fenol-Resorsinol Formaldehit                                                              |
| EPI  | : Emülsiyon Polimer İzosiyanat                                                              |
| MF   | : Melamin Formaldehit                                                                       |
| PUR  | : Poliüretan                                                                                |
| LCA  | : Life Cycle Assessment, Yaşam Döngüsü Analizi                                              |
| GHG  | : Greenhouse Gas-Sera Gazı                                                                  |
| ETS  | : Emisyon Ticaret Sistemi                                                                   |
| GWP  | : Global Warming Potential- Küresel Isınma Potansiyeli                                      |
| YSA  | : Yapay Sinir Ağları                                                                        |
| VOC  | : Uçucu Organik Bileşik                                                                     |
| AWV  | : Akustik Dalga Hızı                                                                        |
| UT   | : Ultrasonik Test                                                                           |
| LDV  | : Lazer Doppler Vibrometre                                                                  |
| LVDT | : Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatörler, Linear Variable Differential Transformer |
| OMA  | : Operational Modal Analysis                                                                |
| MAPE | : Ortalama Mutlak Yüzde Hata, Mean Absolute Percentage Error                                |
| RMSE | : Ortalama Karesel Hatanın Karekökü, Root Mean Square Error                                 |
| MSE  | : Ortalama Karesel Hata, Mean Square Error                                                  |
| SNK  | : Student Newman-Keuls                                                                      |

## 1. GENEL BİLGİLER

Ahşap; karbon depolama yeteneğine sahip, yenilenebilir, yeniden kullanılabilen, düşük karbon ayak izli, geri dönüştürülebilir, çevre dostu, sağlıklı bir materyal olarak bilinmektedir (Di Bella & Mitrovic, 2020). Ahşap yapı sistemleri dünyanın birçok yerinde kullanılmaktadır. Bunlar içerisinde Çapraz Lamine Ahşap (Cross Laminated Timber: CLT) en ilgi çekici ve yenilikçi ahşap yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Beton ve çeliğe kıyasla CLT' nin daha hafif olması, inşa süresinin kısa olması, düşük karbon ayak izine sahip olması ve deprem dayanıklılığı yüksek olması gibi avantajlarıyla dikkat çeken bir yapı malzemesidir. Müstakil evlerden çok katlı yapılara, okullardan oditoryumlara, gösteri merkezlerinden spor salonlarına, tiyatrolardan ticari ve dini yapılara kadar birçok alanda cazip bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Di Bella & Mitrovic, 2020; Hematabadi vd., 2020; Hindman & Golden, 2020). CLT paneller; çatı, duvar ve zeminlerde de kullanılabilen çok yönlü bir ahşap esaslı mühendislik malzemesi olarak Uluslararası Yapı Kodlarına da girmiştir (Brenemen vd., 2024). 2020 yılında yayımlanan çalışmalarda CLT ve diğer yapı malzemeleri ile inşa edilen yapıların yaşam döngüsü (LCA) analizleri incelenmiş, sonuç olarak; CLT ile üretilen yapının küresel ısınma, ozon incelmeleri ve ötrofikasyon etki kategorilerinde önemli düşüşler gösterdiği belirtilmiştir (Jayalath vd., 2020; Liang vd., 2020; Nakano vd., 2020). CLT'nin higrotermal özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda CLT yalıtım özelliklerinin diğer yapı materyalleri ile karşılaştırıldığında daha iyi olduğu ve CLT ile inşa edilen yapılarda enerji tüketiminin daha az olduğu vurgulanmaktadır (Cho vd., 2019). Dolayısıyla son yıllarda bu malzemenin daha cazip hale geldiği ve birçok CLT yapının inşa edildiği görülmektedir (Hindman & Golden, 2020; Navaratnam vd., 2020). Dünya çapındaki CLT pazarının, 2024 yılına kadar %16,2 yıllık bileşik büyüme oranına ve 1,6 milyar dolara ulaşmıştır. CLT yıllık küresel üretim hacminin ise 2025 yıl sonuna kadar ise 3 milyon m<sup>3</sup>'e çıkacağı tahmin edilmektedir (Muszynski vd., 2017; Dugmore vd., 2019). Ancak CLT için pazar talep tahmininin yüksek olduğu bu durumda birim maliyetin yaygınlaşmada önemli bir etkisi olacağı açıktır. CLT ürününün Kuzey Amerika pazarının analiz edildiği bir çalışmada pazara yönelik SWOT analizi yapılarak Avrupa'daki orijinal pazarı ile karşılaştırılmıştır. Araştırmaya göre CLT fiyatlarının kereste piyasası kadar değişken olduğu ve nihai ürün maliyetinin orijinal pazara göre yüksek olması ve kalitede

istikrarın sağlanamaması zayıflık olarak belirlenmiştir. Mevcut durumda orijinal pazardaki CLT üreticileri ile rekabet etmenin güç olduğu vurgulanmıştır (Schwarzmann vd., 2018).

CLT üretiminde en önemli maliyet etkisinin kaliteli hammadde ve kereste maliyetinden geldiği tespit edilmiştir. Çünkü CLT üretiminde, belirli bir kalite standardına sahip kereste kullanımı gereklidir. Ancak, bu kaliteli kerestenin temin edilmesi maliyeti artırmaktadır. Bu noktadan yola çıkılarak çalışmanın araştırma sorusu şu şekilde ortaya koyulmuştur. “CLT üretiminde, nispeten düşük maliyetli, hızlı büyüyen ve geniş yayılım gösteren ağaç türlerinden elde edilen kerestelerin kullanımı mümkün olabilir mi?”. Bu soruya göre, CLT üretiminde kereste kalitesine yönelik bir optimizasyon çalışması yapılarak CLT üretiminde, görünüm ve dayanıklılık sınıflarına göre en uygun kereste kalite ve direnç sınıfının belirlenebileceği hipotezi öne sürülmüştür. Hipotezden yola çıkarak tezin amacı, CLT kullanım yerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra yapısal direnç özelliklerini etkilemeyecek şekilde, üretimde kullanılabilecek kerestelerin ağaç türü, kalite sınıfı ve direnç özelliklerinin EN standartlarında belirtilen kalite ve direnç sınıflandırmalarına uygun olarak optimize edilmesi hedeflenmiştir. Bu durumdan hem yerli kaynaklarımızın etkin kullanımı ile katma değerli ürüne dönüşmesini hem de rekabet gücü yüksek ürünler üreterek ülkemizin ihracat potansiyelini artıracak etki yapması beklenmektedir.

### 1.1. Ahşap Yapılar

Ahşap hem çekme hem de basınç kuvvetlerini taşıyabilen insanlık tarihinin en eski yapı malzemelerinden biri olarak bilinmektedir (Barham vd., 2023). Ahşap; bina, köprü, makine, savaş araçları ve tekne gibi birçok alanda kullanılmıştır (Kuklik & Hansen, 2008). Sürdürülebilir ve yenilenebilir bir doğal kaynak olan ahşabın, yapı sistemlerindeki uygulamaları çok çeşitlidir. Konut veya konut dışı, hafif çerçeve veya kolon-kiriş sistemler ile düşük, orta veya yüksek katlı yapı uygulamalarında kullanılabilmektedir. Ahşap yapıların ve yapısal ahşap malzemelerin önemi her geçen gün artmakta, dünya genelindeki pazar payı hızla genişlemektedir. Hafifliği, sağlamlığı, depreme dayanıklılığı, sağlıklı bir yaşam alanı sunması, stresi azaltması, çalışma verimliliğini artırması, doğa ile uyumlu yapısı, yüksek yalıtım özellikleri, uzun ömrü, mimari esneklik sağlaması ve estetik görünümü gibi birçok üstünlüğe sahip olan ahşap yapılar, başta deprem bölgeleri olmak üzere her türlü yerleşim alanı için ideal bir yapı türü olduğunu kanıtlamaktadır (Thinkwood, 2023a). Buna ilaveten; AB Yeşil Mutabakat kapsamında, binaların inşası, kullanımı ve yenilenmesinde önemli

ölçüde enerji, mineral gerektiği ve yine binaların tüketilen enerjinin %40'ından sorumlu olduğunu vurgulamaktadır. Bu nedenle iklim değişikliği ve enerji verimliliği hedeflerine yönelik binaların enerji performansı ile ilgili mevzuatı titizlikle uygulamayı ve üye ülkelerde kamu ve özel binalarda bir “yenileme dalgası” başlatmayı savunmaktadır. Mutabakat kapsamında, inşaat ve yenileme süreçlerinde enerji ve kaynakların verimli kullanılmasını sağlayacak bir yol haritası oluşturulması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu çerçevede yenileme engellerine ilişkin çözüm üretmek amacıyla yapı ve inşaat sektörü mimarlar, mühendisler ve yerel yönetimlerin birlikte hareket edeceği bir platform üzerinde çalışmaktadır. Dolayısıyla yapı endüstrisi, yeni ve daha çevresel çözümleri araştırmakta ve ağır yapı sistemlerinin yerine alternatif sistemler geliştirmeye çalışmaktadır. Alternatif teknolojik çözümlerin araştırılması amacıyla yapılan birçok çalışmaya göre en geçerli seçenek ahşap sistemler olarak görülmektedir (Lyons,2010; Lehmann, 2013; Hung vd., 2019; Di Bella & Mitrovic, 2020).

## 1.2. Yüksek Katlı Ahşap Yapılar

Ahşap, 19. yüzyılın sonlarına kadar en yaygın tercih edilen yapı malzemesi olarak öne çıkmıştır. Fakat dünyada insan nüfusun hızla artması ile barınma yeri ihtiyacı da artmış ve yapı malzemesi olarak ahşabın yerini, yüksek katlara izin veren çelik ve betonarme almıştır (Kayvani, 2014). Fakat çevresel kaygılar, modern üretim teknolojileri ile üretebilen ahşap malzemeler, prefabrik teknikler ile birleştiğinde mühendislerin her zamankinden daha büyük ve daha uzun ahşap binalar tasarlamasına ve inşa etmesine olanak sağlamaktadır. Modern yüksek ahşap binalar; sürdürülebilir, hızlı ve yüksek kalitede inşa edilebilmektedir (Green & Karsh, 2012).

Yüksek katlı ahşap yapı; yapısal destek sisteminin fonksiyonel bir bileşeni olarak masif ahşap elemanları kullanan altı katın üzerindeki bir yapı (en üst kat yerden 18 m'den yüksektir) olarak tanımlanmaktadır. İleri yapı teknikleri ve çağdaş ahşap mühendislik ürünleriyle birlikte birçok ülke yüksek katlı ahşap yapı inşa etmektedir. Yüksek katlı ahşap yapıların bazı önemli avantajları bulunmaktadır (Canadian Wood Council, 2024):

- Üst yapı ve temellerin diğer yapı malzemelerine göre daha hafif olması, zayıf zeminli bölgelerde yüksek katlı yapılar inşa edilmesine olanak tanımaktadır,
- Şantiyede inşa etmek diğer yapı malzemelerine nazaran daha gürültüsüz şekilde yapılabilir,

- Ahşap yapılar inşa süresi diğer yapı materyalleri ile kıyaslandığında 1/3 oranında daha kısadır (Wood Campus. 2023a)
- Bina yapısında ve dış kabuğunda uygulanan yalıtımlar, enerji modellemesiyle bir araya geldiğinde, yüksek operasyonel enerji verimliliğine, artırılmış hava sızdırmazlığına, daha iyi iç hava kalitesi ve geliştirilmiş insan konforuna sahip binaların inşa edilmesini sağlamaktadır.
- Ahşap yapılarda yaşayan insanlarda kan basıncının düştüğü, stres seviyesinin azaldığı ve bilişsel kapasitenin arttığı rapor edilmiştir (Wood Campus. 2023b).
- Ahşap yapı inşaatlarında enerji etkinliği yüksek, atık %90 oranında az ve iş kazası riski çok daha düşüktür (Wood Campus. 2023a).

### **1.2.1. Yüksek Katlı Ahşap Yapılarda Kullanılan Ahşap Mühendislik Ürünleri**

Masif ahşap; modern ahşap yapıların inşası için gereklilikleri karşılayamamakta, bu da mühendislik ürünü ahşap ürünlere ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır. Ancak geleneksel kerestenin boyutu ve gücü, kesildiği ağacın uzunluğu veya genişliği ile kısıtlıdır. Bu kısıtlamaları ortadan kaldırmak için ahşap mühendislik ürünleri (EWP) geliştirilmiştir (Satir, 2023). Ahşap yapılara olan ilgi arttıkça, bu yapılarda kullanılan mühendislik ürünü ahşap malzemelerin çeşitliliği ve üretim hacmi de giderek artmaktadır. Geleneksel ahşap yapılarda sıklıkla kullanılan masif malzemeler yerine sürdürülebilir, orman kaynaklarını ekonomik kullanılan ve istenilen boyutlarda üretilebilen mühendislik malzemeleri almaktadır. Ayrıca, çevre dostu bir yapı malzemesi olarak ahşabın, büyük ve yüksek konutların yanı sıra ticari ve endüstriyel binaların inşasında kullanımına yönelik talep hızla artmaktadır. Büyük boyutlu masif ahşap malzemeleri tedarik etme ve pazar taleplerini karşılama konusundaki güçlükleri gidermek adına, teknolojinin ilerlemesiyle katma değerli ahşap bazlı ürünler ve yapı malzemeleri üretilmektedir. Bu durumun neticesi olarak keresteye olan yüksek talep seviyeleri ve azalan kereste tedariği nedeniyle, kereste maliyeti hızla artmaktadır. Azalan yüksek kaliteli kereste tedariğine ve artan kereste maliyetlerine karşılık ortaya Mühendislik Ürünü Ahşap Malzemeler çıkmıştır. Bu mühendislik ürünleri; tomruğun daha verimli ve daha uygun maliyet ile kullanımına imkân sağlamaktadır (McKeever, 1997).

Mühendislik ürünü ahşap malzemeler, esas olarak yapısal uygulamaları hedefleyen ahşap malzemeler ve yapıştırıcılar ve/veya bağlantı elemanları (çiviler ve dübeller gibi) ile üretilmiş bir ürün olarak ifade edilmektedir. Mühendislik ürünü ahşap malzemeler,

genellikle doğadan ve yenilikçi teknolojiden ilham alan bir mühendislik tasarım ürünü olarak tanımlanmaktadır (Gong, 2021).

Mühendislik ürünü ahşap malzemeler, geleneksel masif ahşap ürünlere göre birçok avantaj sunduğu belirtilmektedir (Thelandersson & Larsen, 2003; Hsu, 2016).

1. Ölçü sınırlandırması bulunmamaktadır;
2. Lif, kaplama ve kereste şeklindeki ham ahşap malzemelerin daha verimli kullanılmasına olanak tanımaktadır;
3. Masif ahşaptan daha düzgün ve güvenilir özelliklere sahiptir, çünkü masif ahşapta bulunan mukavemeti azaltan kusurlar büyük ölçüde giderilmektedir,
4. İmalat süreçleri sırasında, ısı ve basınç kullanımı nedeniyle, biçilmiş keresteden daha büyük boyutsal kararlılık ve toleranslar sergilemektedir;
5. Tasarım esneklikleri nedeniyle kendilerini masif ahşaptan çok daha kolay pazar gereksinimlerine uyarlayabilme potansiyeline sahiptir.

Uluslararası yapı kodları bu kapsamda güncellenmiştir. 2015 yılında tip III ve IV’ de tanımlanmış, 2018 yılında kullanımı genişletilmiş nihayet 2021 yılında 18 katlı yapılar için yapısal ahşap kullanımı tip sınıflar içinde verilmiştir (Hunt, 2018; Breneman vd., 2019; Layton, 2020; Thinkwood, 2023b). Mühendislik ürünü ahşap malzemeler, kereste ürünlerine kıyasla çok daha büyük boyutlarda kullanılabilir olması, boyutsal stabilitesinin yüksek olması, rijitlik ve dayanım özelliklerinin yüksek olması sayesinde yapı amaçlı kullanımlarda dikkat çekmektedir (Schickhofer vd., 2016). Ahşap mühendislik ürünleri malzeme pazarı, yeni konut inşaatları, tamir ve yenileme projeleri ile ofis, okul, restoran, mağaza ve depo gibi konut dışı yapıların artışıyla birlikte büyümekte olup, bu malzemeler katma değerli ürünler kategorisinde değerlendirilmektedir (FAO, 2024). 2016 APA verilerine göre, mühendislik ürünü ahşap malzemeler içerisinde yapısal olarak kullanılan; Kontrplak, Laminated Veneer Lumber (LVL), Parallel Strand Lumber (PSL), Laminated Strand Lumber (LSL), Glulam, Çapraz lamine ahşap (CLT) gibi tabakalı ahşap malzemeler bulunmaktadır (Engineered Wood Association, 2024). Mühendislik ürünü ahşap malzemeler içerisinde sadece yapısal ve daha hacimli malzemeler Mass Timber olarak bir alt grupta daha toplanmıştır. Literatür incelendiğinde bu ürün kategorisine CLT, Glulam, NLT (Nail Laminated Timber), DLT (Dowel Laminated Timber), Massplywood dahil edilmektedir (Ayanleye vd., 2022; Thinkwood, 2023c). Yeni nesil mühendislik malzemeleri kullanılarak birçok yüksek katlı ahşap yapı inşa edilmiştir. Bazı önemli yüksek katlı ahşap yapılara örnek olarak; Kuzey Amerika'da Vancouver’ da bulunan Brock Commons Tall wood House;

Portland’ da Carbon12, Cleveland’ da Intro; Milwaukee’ de Ascent; Washington, DC’de 80 M Street; Charlottesville’ de Apex Clean Energy; Boston’ da 11 E. Lenox; Seattle’ da Heartwood; ve Portland’ da ki sayılabilir (Satır, 2023)



Şekil 1. Yüksek katlı ahşap yapı örnekleri (URL-1, 2025)

Çivili Lamine Ahşap (NLT): Son yıllarda yeniden popülerlik kazanan, yeni tasarım kılavuzları ve yapım yöntemleriyle güncellenen asırlık bir inşaat yöntemidir. NLT masif bir ahşap kompozit paneldir. Katmanları yapıştırmak için yapıştırıcı kullanmak yerine keresteler çiviler kullanılarak birleştirilmektedir (Şekil 2). NLT, şantiyeye yakın geçici bir atölyede veya şantiyede monte edilebilmektedir (Atkins vd., 2022). NLT, ilgi çekici mimari yaratmak için bir dizi modern fırsat sunan eski bir inşaat yöntemidir. Birçok tarihi uygulamada kullanılmış masif ahşabın ve ileri ahşap teknolojisi ve üretiminin birçok faydasını keşfettikçe, yeniden ilgi görmüştür (Council, B.S.L., 2017).

NLT panelleri en yaygın olarak yatay uygulamalarda (yani zeminler ve çatı katları) kullanılmaktadır. Sonuç olarak, kapılar ve pencereler için gerekenler gibi daha az hassas

işlenmiş açıklıklara ihtiyaç duyulmaktadır. NLT panelleri işlenirken NLT'de kullanılan metal çivilerin testere ve matkap gibi ahşap işleme aletlerini köreltebilmesi veya bunlara zarar verebilmesi en önemli dezavantajı olarak görülmektedir. Panellerin genişliği ve uzunluğu sadece uygulamanın boyutları ile sınırlıdır. NLT, Uluslararası Bina Kodu (IBC) tarafından farklı yüksekliklere, alanlara ve kullanım alanlarına sahip binalar için kod uyumlu olarak kabul edilmektedir (Atkins vd., 2022).



Şekil 2. Çivili Lamine Ahşap (NLT) (StructureCraft, 2019a).

Dübel-Lamine Ahşap (DLT): NLT'ye benzer, ancak levhaları çiviler yerine ahşap dübeller bir arada tutmaktadır. Birleştirme işleminde, sert ahşap dübeller çok düşük rutubete kadar kurutulur ve kenarlarda ve yan yana istiflenmiş yumuşak ahşap levhalara dik olarak açılan deliklere yerleştirilmektedir. Daha sonra sert ahşap dübeller, çevredeki yumuşak ahşap levhalardan nem kazandıkça genişleyerek malzemeyi birleştirmektedir. Panelin genişliği istenilen ölçüde oluşturulabilir, ancak kalınlık, kullanılan ahşap levhaların genişliğine bağlıdır. DLT, zemin ve çatı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak DLT'nin tek Kuzey Amerikalı üreticisi olan StructureCraft, panellerinin dikey uygulamalarda da kullanılabileceğini belirtmektedir. (Atkins vd., 2022).

DLT, tamamen ahşap olan tek masif kereste ürünüdür. Metal bağlantı elemanı olmayan DLT paneller, kesici takımlara zarar vermeden CNC makinelerde işlenebilmektedir. Bir panelde belirli profillere ihtiyaç duyulduğunda (örneğin, akustiği geliştirmek için bir tasarım) genellikle DLT'nin seçilmesinin nedeni budur. Tamamı ahşap yaklaşımı, yapı tasarımcılarının kimyasal yapıştırıcı içermeyen bir malzeme seçmesine de olanak tanımaktadır (Atkins vd., 2022).

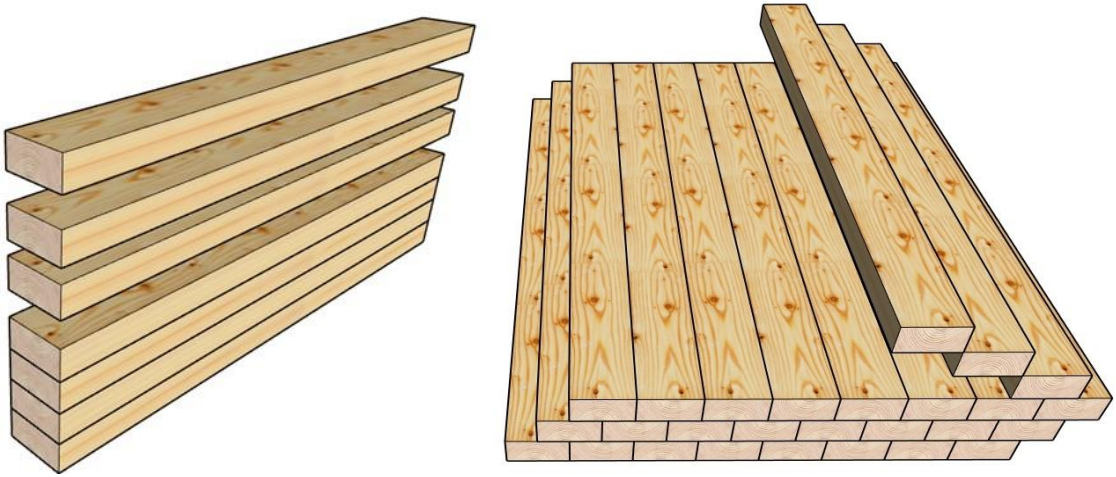


Şekil 3. Dübel-Lamine Ahşap (DLT) (StructureCraft, 2019b).

Yapıştırılmış Lamine Ahşap (Glulam): çok çeşitli uygulamalarda kullanıma potansiyeline sahip bir masif kereste ürünüdür (Ong, 2015). 1900'lerde Almanya'da ortaya çıkan Glulam, 1950'lerde Avustralya'da benimsendi, ancak bu ülkede hala Avrupa ve Kuzey Amerika'daki kadar sık kullanılmamaktadır. Bununla birlikte, bu ürün, uygun teknik özellikleri ve sürdürülebilir uygulamaları geliştirmeye yönelik artan ihtiyaç nedeniyle inşaat endüstrisinde ilgi görmektedir.

Glulam, laminasyon liflerinin elemanın uzunluğuna paralel uzandığı çok boyutlu kereste katmanlarından oluşmaktadır. Tek tek kereste parçaları, performans özelliklerine göre mukavemet açısından derecelendirilir sağlam ve neme dayanıklı bir yapıştırıcı ile birbirine yapıştırılır. Bireysel laminatlar, tasarım gereksinimlerine uygun olarak daha fazla uzunluklar üretmek için genellikle parmak birleştirme ile birleştirilir. Glulam elemanların boyutları üretici firmaya göre değişebilmekle birlikte, genellikle 180–630 mm kalınlık, 66–200 mm genişlik ve 50 m uzunluğa kadar üretilibilmeleri, kiriş ve kolon olarak kullanıma uygun olmalarını sağlamaktadır. Değişken olmasına rağmen, elemanın uzunluğu genellikle taşıma sınırlamaları ile sınırlıdır (Ong, 2015).

Glulam ahşap ürününün en önemli avantajlarından biri hem mimari hem de yapısal tasarım gereksinimlerini karşılayabilecek büyük boyutlarda ve karmaşık şekillerde üretilmesidir. Glulam, üstün mukavemet ve sertlik özellikleri sayesinde oldukça yüksek bir mukavemet-ağırlık oranına sahiptir. Glulam'ın, geleneksel masif keresteye kıyasla daha güçlü ve daha güvenilir bir malzeme olduğu belirtilmektedir (Ong, 2015).



Şekil 4. Yapıştırılmış Lamine Ahşap (Glulam)

### 1.3. Çapraz Lamine Ahşap (CLT)

Mühendislik ürünü ahşap malzemeler arasında yapısal olarak kullanılabilen Glulam ve CLT gibi lamine ahşap türleri yer almaktadır. Dünyada CLT gibi yeni ürünler ve sistemler son zamanlarda yüksek katlı binalarda görülmektedir. Masif ahşap inşaatın en önemli üyelerinden biri olan CLT; hızlı inşaat, yüksek mukavemet/kütle oranı, maliyet, sismik ve akustik performans, enerji verimliliği, yangından korunma ve daha düşük karbon ayak izi (karbon tutumu) ve üretim sürecinde daha az enerji gereksinimi gibi çevresel avantajlar nedeniyle son yıllarda popüler haline gelmiştir (Satir, 2023). Günümüzde, betonarme veya diğer mineral bazlı katı yapı malzemelerine daha yüksek değerli bir alternatif olan CLT üzerine yapılan yoğun araştırmalar ilk olarak 1990 yılında Graz / Avusturya'da başlamıştır. Daha sonra, Moser (1995) tarafından mevcut teknoloji kullanılarak, ilk CLT konut binaları yapılmıştır. Yoğun araştırma ve geliştirmeye paralel olarak yaklaşık 15 yıl önce, özellikle Almanya, Avusturya ve İsviçre gibi Orta Avrupa Ülkelerinde, küçük çaplarda endüstriyel ölçekli üretim tesisleri kurulmuştur. Avrupa'da CLT'nin standartlaştırılması ile ilgili ilk faaliyetler, 2008 yılında başlamış ve CLT'nin ilk Avrupa ürün standardı olan TS EN 16351 (2014) resmi oylama ile yürürlüğe girmiştir. Sadece Avrupa'da değil, Kanada, ABD, Japonya, Çin ve Yeni Zelanda gibi diğer ülkelerde de standardizasyon ve uyum konusunda küresel üretim sahaları kurularak yatırım kararları alınmıştır (Farniev, 2019).

CLT panelleri, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilmektedir (Ceccotti vd., 2010). CLT panellerin kullanımı, Avrupa'da piyasaya sunulmasından bu yana popüler ve etkili bir inşaat yöntemi olarak öne çıkmıştır. CLT; tek katlı ve çok katlı aile konutlarında,

orta ölçekli kamu binaları (1-7 katlı), orta ölçekli endüstriyel/ticari binalar (1-7 katlı) ve büyük ölçekli (1-7 katlı) dahil olmak üzere farklı bina türlerinde kullanılmaktadır (Larasatie vd., 2020). Orta ölçekli kamu binaları arasında devlet okulları, spor tesisleri, kütüphaneler ve hükümet binaları yer almaktadır (Larasatie vd., 2020).

CLT sadece bir malzeme değil, zemin, duvar ve çatıda da kullanılabilen çok yönlü bir yapı sistemidir (Lehmann & Hamilton 2011). CLT ile inşa edilmiş pek çok yapı günümüzde bulunmaktadır. Bu yapılardan 6 katın üzerinde ilk yüksek katlı CLT yapı olma özelliği ile Stadhaus en göze çarpanlarından biri olarak ifade edilmektedir (Lattke & Lehmann, 2007; Kaufmann, 2011; Wells, 2011).

CLT; yenilenebilir, sürdürülebilir ve uygun maliyetli bir yapı elemanı olarak son yıllarda popülaritesi önemli ölçüde artmaktadır (Vallely & Schoenwald, 2023). Popülaritesinin bu denli hızlı artmasının nedenleri olarak CLT' nin sağladığı önemli faydalar gösterilmektedir.



Şekil 5. Çapraz Lamine Ahşap (CLT)

### 1.3.1. CLT'nin Faydaları

CLT'nin çevresel faydaları; yenilenebilir, sürdürülebilir ve çevresel bir yapı materyali olarak tanımlanmaktadır (Vallely & Schoenwald, 2023). Ormanlar sürdürülebilir bir şekilde yönetildiğinde, odun karbon nötrdür ve büyüyen bir stok veya katma değerli bir ürün olarak bir depo görevi görmektedir (Bowyer vd., 2011; Thinkwood, 2023d). Ağaçlar, fotosentez yaparak karbon tutma sürecinde karbondioksiti biyokütleyle dönüştürmektedir (Lehmann & Hamilton 2011). Bir metreküp ahşap, metreküp başına yaklaşık 1,10 ton CO<sub>2</sub> depolamaktadır (Malmsheimer vd., 2008). Sürdürülebilir orman yönetimi ve inşaatlarda ahşap

ürünlerin yaşam döngüsü üzerine yapılan araştırmalarda, ormanlarda yetişen ahşabı yüzlerce yıl bekletmek yerine, ormanın düzenli olarak hasat edilmesinin hastalıklı, yanmış veya böcek istilasına uğramış ağaçlar ve yeni ağaçların sağlıklı bir şekilde yenilenmesini sağladığı belirtilmektedir (Lippke vd., 2011; Ritter vd., 2011). Ayrıca CLT; çelik ve beton ile karşılaştırıldığında, yüksek performanslı ve çok yönlü inşaat malzemeleri olmakla birlikte, çevresel ayak izleri açısından önemli bir farklılık göstermektedir: Örneğin, dünya çapındaki tüm sera gazı (GHG) emisyonlarının yüzde beşi beton üretiminden kaynaklanmaktadır. Bu anlamda, genel olarak ahşap ve özel olarak CLT hem betondan hem de çelikten daha iyi performans göstermektedir (Wilson, 2005; Lehmann & Hamilton, 2011). Ahşap ürünler üzerinde Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) araştırması, ahşabın daha az sera gazı ürettiğini ve dönüştürmek için beton ve çeliğe göre daha az miktarda su, enerji ve fosil yakıt gerektirdiğini göstermiştir (CORRIM, 2006; Bergman vd., 2010; Puettmann vd., 2010; Oneil & Lippke 2010).

CLT'nin kurulum kolaylığı ve maliyet rekabet gücü; geleneksel yapı malzemelerine göre çeşitli çevresel, ekonomik ve yapısal avantajlara sahiptir ve inşaat sektöründe çok yönlü, bağımsız bir yapı elemanı olarak umut vaat etmektedir (Vallely & Schoenwald, 2023). Üstün mühendislik özellikleri, artan maliyet rekabetçiliği ve bulunabilirliğinin yanı sıra inşaat endüstrisindeki sürdürülebilirlik etkeni nedeniyle bina inşaatında küresel popülerlik kazanmıştır (Krauss vd., 2023). Bir bina sistemi olarak CLT'nin en çekici özelliklerinden biri, CLT binalarının inşa edilebileceği hızdır (Ceccotti vd., 2010). CLT'nin prefabrik doğası, yüksek hassasiyet ve daha hızlı tamamlama, daha fazla güvenlik, şantiyede daha az vasıflı işçi talebi, çevreye daha az zarar verme ve daha az atık üretimi ile karakterize edilen bir inşaat süreci sağlamaktadır (Toosi, 2011; APA, 2016). CLT elemanları çatılar, duvarlar ve döşeme yapıları için kullanılabilir ve fabrikadan çeşitli boyut ve şekillerde (genellikle nakliye gereksinimleri ile sınırlıdır) teslim edilebilmektedir. Pencere ve kapılar için açıklıklar, CNC makineleri kullanılarak hassas bir şekilde kesilebilmektedir (Crespell vd., 2010). Bu bilgisayarlı sistem, imalat atıklarını ve zamanını en aza indirerek ve nihai ürünün hassasiyetini garanti ederek, ağaç kaynaklarının kullanımındaki verimliliği artırmaktadır. Mekanik hizmetler, kapılar, pencereler ve bağlantılar için gerekli yapısal şekiller ve geçişlerin tümü, bilgisayarla sayısal olarak kontrol edilen (CNC) makineler kullanılarak önceden üretilmekte böylece inşaat maliyetlerinden ve montaj süresinden tasarruf sağlandığı ifade edilmektedir (Krauss vd., 2023). CLT yapısı, dikey ve yatay kuvvetlere mükemmel yanıt veren yapısal olarak kararlı bir yapının oluşturulmasını sağlayan

çok basit mekanik bağlantı sistemleri kullanılarak yerinde monte edilmektedir. CLT elemanların kaldırılması ve monte edilmesi için yalnızca basit aletler ve vidaların yanı sıra yerinde vinçler gerektirmektedir (Kirkegaard, 2012). Geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla bu kadar kısa inşaat süreleri, projelerin daha hızlı tamamlanmasına ve dolayısıyla daha az işçilik maliyetine olanak tanımaktadır (Waugh, 2010; Pons & Wadel, 2011).

CLT'nin yapısal performansı; CLT elemanlarının en etkileyici avantajlarından biri, diğer malzemelerle karşılaştırıldığında sağlamlık/ağırlık oranlarıdır. CLT paneller düşey ve yanal yükleri taşımak için yapısal duvar olarak kullanılabilir (Shen vd., 2023). CLT' nin lif yönlerine dikey olarak sıkıştırılmış olması mekanik özellikler bakımından, Glulam'dan önemli ölçüde daha fazladır. Bunun nedeni, CLT' nin çapraz katmanlı konfigürasyonunda üretilmesidir. Bu şekilde, bitişik CLT elemanları katmanları birbirini destekler ve takviye görevi görür, bu da CLT' nin daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu yapısı sayesinde, her bir CLT elemanı, her yöndeki kuvvetlere karşı koyabilen, kendi başına kararlı bir yapı oluşturmaktadır (Pons & Wadel, 2011). Bu özellikler, CLT panellerinin duvarlar, çatılar ve zeminler için kullanılmasına izin vermektedir. (Steiger vd., 2008). Nispeten yüksek düzlem içi rijitlik ve boyut kararlılığı ile yeşil yapı malzemelerine duyulan ihtiyaç, CLT'yi beton ve çeliğe alternatif haline getirmektedir (Huo vd., 2022). Masif ahşap yapılar, beton ve çelik yapılara göre yüksek dayanım/ağırlık oranına ve farklı bağlantı sistemlerine sahip olduğundan yanal yükler altında farklı bir davranış sergilemektedir (Ma & Dai, 2023). Geliştirilen bazı masif panel varyasyonlarında iki CLT plaka arasında ahşap kirişler kullanılarak oluşturulan boşluklar sayesinde daha büyük açıklıkların geçilmesine imkan sağlanmaktadır. Buradaki amaç mukavemetten ödün vermeden yapının ağırlığını azaltmaktır (Crespell vd., 2010; Chen, 2011). Diğer bir varyasyon ise, geleneksel CLT panellerinden farklı olarak, üretimi sırasında yapıştırıcılar kullanmayan, her levhayı ve katmanı "kilitlemek" için zıvana ve kırlangıç kuyruğu doğramaları kullanan "kilitli" paneldir. Bu, uçucu organik bileşik (VOC) yayan yapıştırıcıların kullanımını ortadan kaldırarak panelin kullanım ömrü sonunda demonte edilmesine ve yeniden kullanılmasına olanak tanımaktadır (Smith, 2011).

CLT'nin tasarım esnekliği; CLT' nin yapısal özellikleri, yapının yapısal bütünlüğünden ödün vermeden çok çeşitli boyut ve formlardaki şekillere ve açıklıklara izin vermektedir (Kirkegaard, 2012; FPInnovations, 2013). Elemanların boyutunun neredeyse sadece imalat ve nakliye kapasitesiyle sınırlı olması, tasarımcılara daha geleneksel malzemelerle elde edilebilecek aynı sağlam yapıyı oluşturmak için daha az ama daha büyük

elemanlara sahip olma imkanı vermektedir. Daha az elemanlı bir yapı aynı zamanda daha fazla basitlik anlamına gelmektedir. Gerçek yapı daha karmaşık hale gelmeden daha karmaşık tasarımlar elde edilebilmektedir (biçim, yükseklik, açıklıklar, diğerleri arasında). Binanın birkaç temel unsura sadeleştirilmesi, inşaat profesyoneline daha fazla özgürlük sağlamaktadır (Waugh, 2010).

CLT'nin yangın ve sismik performansı; Genellikle insanlar, ahşabın yanıcı bir malzeme olmasından dolayı, ahşap binaların yangınlarda kötü performans gösterdiği gibi yanlış bir düşünceye sahiptir. Bununla birlikte, geniş kesitli ahşap elemanlar, ahşabın benzersiz kömürleşme özelliklerinden dolayı yangına dayanıklılık sağlama konusunda doğal bir yeteneğe sahiptir (Toosi, 2011). Ahşap elemanlar daha yavaş ve öngörülebilir şekilde yanarlar ve kömürleşmemiş ahşabı koruyan bir kömür tabakası oluşturarak, çeliğin yaptığı gibi aniden çökmeden mukavemetini ve boyutsal kararlılığını korumasına izin verirler (Frangi vd., 2009; Forest Product Lab, 2010). Forest Products Lab ASTM E119 (2012) standardına uygun olarak yürütülen tam ölçekli yangın testlerinin sonuçları, CLT'nin mükemmel yangın direnci sağlama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Dagenais vd., 2012). CLT panelleri, yavaş ve öngörülebilir bir hızda kömürleştikleri için, yangına maruz kaldıklarında yapısal kapasitelerini uzun süre koruyabilmektedir (Frangi vd., 2009; FPInnovations, 2013). Bu çalışmalar ayrıca, bir veya iki kat alçı eklenmesinin sırasıyla otuz ve altmış dakikalık ek bir yangın direnci sağlayabileceğini göstermiştir. Frangi vd., (2009) göre CLT' nin yangın performansı sadece ahşaba değil aynı zamanda levhaları ve katmanları birbirine yapıştırmak için kullanılan yapıştırıcıya da bağlıdır, bu nedenle yüksek sıcaklıklara karşı daha düşük hassasiyete sahip yapıştırıcıların kullanılması CLT panellerin yangın davranışını büyük ölçüde iyileştirecektir. CLT binalarının sıkı yapısı, yangının bitişik alanlara yayılmasını sınırlandırarak yangın performansını da artırmaktadır (Craft, 2011). Sismik performans açısından, ahşap binalar, geleneksel malzemelerle inşa edilen yapılardan daha hafif ve daha sünek oldukları için iyi performans göstermektedirler (Popovski vd., 2010). İtalya'daki Araştırma Enstitüsünün (the Trees and Timber Research Institute of Italy) Japonya'da tam ölçekli yedi katlı bir CLT bina üzerinde gerçekleştirdiği sarsma masası testleri sonucunda elde edilen mükemmel sonuçlar bunu doğrulamaktadır. Şiddetli bir deprem simülasyonuna (Richter ölçeğine göre 7,2 büyüklüğünde) tabi tutulduğunda bile yapının, testten sonra önemli bir deformasyon göstermediği belirtilmektedir (Popovski vd., 2010). CLT binaları için pratik bir sismik tasarım prosedürü geliştirmek için, Kanada'da FPInnovations tarafından farklı geometri ve bağlayıcı konfigürasyonlarına sahip bir dizi

duvar test edilmiştir. Tekli CLT duvar panelleri üzerindeki bu testlerin sonuçları, bağlantı düzeni ve tasarımının duvarın genel davranışı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu ve ortaya çıkan sistemin çok dirençli olabileceğini göstermiştir (Ceccotti vd., 2006). CLT duvarlarının, yapıların sismik kuvvetlere dayanması için temel bir koşul olan duvar panellerinin hareketine izin verdiği gösterilmiştir (Lauriola vd., 2006).

CLT'nin termal performansı; Bir binanın hava geçirmezliği, termal performansı için kritik öneme sahiptir (Burnett vd., 2005). Çünkü bu özellik duvarın yalıtım performansını belirlemekte ve böylece iç ortam sıcaklığını kontrol etmektedir. Bu konuda CLT'nin ana avantajı, geniş paneller sayesinde sıkı bir yapı oluşturma imkanı sunması ve daha az elemana dolayısıyla binaya havanın sızabileceği daha az boşluklara sahip olma imkanı sunmasıdır (Mallo, 2014). Burnett vd., (2005), tarafından yapılan araştırmalar CLT'nin iyi miktarda termal direnç sunduğunu göstermiştir. CLT paneller hem bina muhafazasında hem de iç döşeme ve duvarlarda, gün boyunca ısıyı depolayan ve geceleri salan termal bir kütle görevi görmektedir. Termal kütle (bazı iklimlerde ve yılın bazı dönemlerinde) ısıtma ve soğutma yüklerini büyük ölçüde azaltabilir, tepe yüklerin zamanını değiştirebilir, genel bina enerji kullanımını azaltabilir ve bina sakinlerinin konforunu artırabilmektedir (Burnett vd., 2005; Mallo, 2014). Bu masif duvarların yalıtım kapasitesi, yalıtım ihtiyacını azaltabilmektedir (Falk, 2005).

### 1.3.2. CLT Maliyetini Etkileyen Faktörler

Ahşabın maliyeti CLT üretiminde ana unsurdur ve bazen toplam üretim giderlerinin neredeyse yarısını oluşturduğu tahmin edilmektedir (Anderson, 2016). Yapılan bir çalışmada CLT panellerinin maliyetinin %50-77'ye kadarının malzeme maliyetinden kaynaklandığını göstermiştir (Toosi, 2011; Beck Group, 2015). Başka bir çalışma aynı zamanda kereste fiyatlarındaki değişimin bir CLT panelinin nihai fiyatını etkileyen bir unsur olduğunu göstermiştir (Brandt vd., 2019).

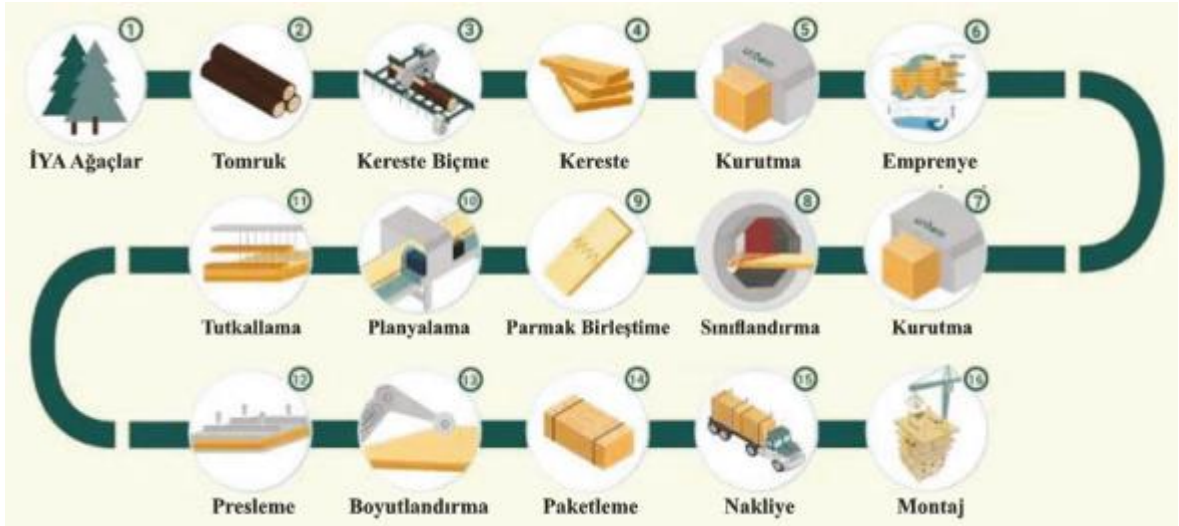
CLT üretim maliyetini azaltmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar üretimde kullanılan hammaddenin türü ve direnç özelliklerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca her ülke kendine özgü bol miktarda bulunan ağaç türünün CLT üretiminde kullanım olanaklarını araştırarak maliyeti düşürmeyi amaçlamıştır.

Farklı yapısal kullanımlara yönelik ahşap, ağaç türüne, kökenine, mukavemet azaltıcı özelliklerine ve geometrik özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır (BSI, 2013; BSI, 2016a;

BSI, 2016b; BSI, 2017). CLT genel olarak ladinden üretilmekte ve yaygın olarak dayanıklılık sınıfları C16, C18 ve C24 kullanılmaktadır (Brandner, 2013). CLT hammaddesi olarak yerleşik yapısal özellikleri bulunmayan, yerel olarak bol miktarda bulunan, az kullanılan kereste kaynaklarının kullanımına artan bir ilgi bulunmaktadır (Espinoza & Buehlmann, 2018). Örnekler arasında Sitka ladini (Crawford vd., 2014; Crawford vd., 2015; Sikora vd., 2016), İtalyan deniz çamı (Fragiacomo vd., 2015; Concu vd., 2016), Avrupa kayını (Aicher, vd. 2016a; Aicher, vd. 2016b; Franke, 2016), geniş yapraklı kayın (Essoua & Blanchet 2017), Güney çamı (Hindman & Bouldin, 2015; Sharifnia & Hindman, 2017), hibrit kavak (Kramer vd., 2014), lale ağacı (Mohamadzadeh & Hindman, 2015; Thomas & Buehlmann, 2017), kavak (Wang vd., 2014), okaliptüs (Liao vd., 2017) ve Japon sediri (Okabe vd., 2014) gösterilebilir. Alabama'da yerel Güney çamını kullanan yeni bir CLT ve glulam tesisine yapılan yatırım bol miktarda yerel malzeme kullanılması durumunda tipik Avrupa CLT üretiminde kullanılanlara alternatif hammaddelerin ekonomik olarak uygun hale gelebileceğini göstermektedir (Vloysky, 2017).

### 1.3.3. CLT Üretimi

CLT, genel olarak Şekil 6'da belirtilen adımlar takip edilerek üretimi yapılmaktadır;



Şekil 6. CLT üretim akış şeması (Demir vd., 2024).

### 1.3.4. CLT Üretiminde Kullanılan Ağaç Türleri ve Hammadde Özellikleri

Günümüzde küresel olarak, CLT üretiminde ladin, göknar (SPF), Norveç ladin, Douglas göknar, karaçam gibi yumuşak ağaç türleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Dong vd., 2023). Bununla birlikte, hammadde kaynağını daha da genişletmek ve CLT'nin özelliklerini geliştirmek için, son yıllarda CLT veya hibrit CLT üretmek üzere bazı hızlı büyüyen ağaç türlerinin de kullanıldığı çalışmalara rastlanmaktadır (Dong vd., 2023). Ayrıca ağaç türü açısından literatür incelendiğinde; 2020 yılında tsuga ve veymut çamı gibi düşük değerli ağaçların CLT üretiminde kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmıştır.

CLT üretimi için genelde iğne yapraklı ağaç türleri kullanılmakla birlikte ekonomik ve çevresel faktörler nedeni ile dünyada kavak, kayın gibi yapraklı ağaç türlerinin de CLT üretiminde kullanımına yönelik çalışmalar mevcuttur (Brander, 2013; Gong vd., 2015; Aicher vd., 2016b; Crovella vd., 2019; Dugmore vd., 2019; Satir, 2023). Macaristan'da yürütülen bir çalışmada, ülkenin coğrafi ve iklim koşullarının iğne yapraklı ağaç yetiştirmek için uygun olmadığı ve hammadde ithal edilmesinin akılcı olmadığı vurgulanarak ekolojik açıdan yerel seçeneklerin tercih edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Söz konusu çalışmada Macaristan' da önemli bir ekonomik değere sahip kavak türünün CLT üretiminde kullanım olanakları araştırılmıştır (Marko vd., 2016). Kavak ve bambu gibi hızlı büyüyen türlerin de CLT üretiminde kullanıldığı çalışmalar da literatür de bulunmaktadır (Shi vd., 2022; Dong vd., 2023). Buna ilaveten tik ağacı ve gmelina gibi tropik türlerin de CLT üretiminde kullanımının araştırıldığı çalışmalar literatür de mevcuttur (Muñoz vd., 2022). Buna ilaveten manolya ve kavak türlerinin CLT üretiminde kullanıldığı bir çalışma da 2023 yılında gerçekleştirilmiştir (Satir, 2023). Bu kadar popüler bir yapısal malzemenin üretiminde kullanılan ağaç türleri büyük önem taşımaktadır ve bu türlerin kalite ile direnç sınıfı, CLT'nin kalitesini etkileyen en önemli faktörler arasında yer almaktadır.

### 1.3.5. CLT Üretiminde Kullanılan Tutkal Türleri

CLT elemanlarındaki katmanları birbirine bağlamanın temel yöntemi, katmanlar arasına bir yapıştırıcının uygulanmasıdır. CLT imalatçıları için yapıştırıcıların önemli özelliklerden bazıları ahşabın ahşaba bağlanma mukavemeti, sertleşme süreleri ve yayılma oranları gibi üretimle ilgili özellikler, nem direnci, sıcaklık direnci ve çevresel ve sürdürülebilirlik hususlarıdır (Pizzi & Mittal, 2003). CLT ticari ve deneysel üretim için

aşağıda belirtilen çeşitli yapısal yapıştırıcı türleri kullanılmaktadır (Karacabeyli & Gagnon, 2019):

- Fenol-resorsinol formaldehit (PRF) gibi fenolik türler
- Emülsiyon polimer izosiyanat (EPI)
- Melamin formaldehit (MF)
- Tek bileşenli poliüretan (PUR)

Fenol Resorsinol Formaldehit (PRF), koyu kahverengi bir yapıştırıcı olup, Kuzey Amerika'da tutkallı kiriş üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıştırıcı birçok faktörden dolayı piyasada popüler olmuştur; iyi yapısal performansa sahiptir, uzun süreli kullanım süresine sahiptir ve yüksek sıcaklıklara ve yangınlara maruz kaldığında iyi özelliklere sahiptir (Yeh, vd., 2013). PRF, aynı zamanda tutkallama işleminin yapısal endüstrisinde kullanılan daha ekonomik yapıştırıcılardan biri olarak da bilinmektedir (Sikora, vd., 2016). PRF üretim sırasında kürlendikten sonra tabakalar arasında büyük hava boşluklarının oluşabilmesi yangına karşı direncini olumsuz olarak etkilemektedir. Bu, olası bir yangının tabakaların arasında yayılmasını kolaylaştırmaktadır (Klippel, 2014).

Emülsiyon Polimer İzosiyanat (EPI) olarak adlandırılan yapıştırıcılar, su bazlı bir emülsiyonun çapraz bağlayıcı bir izosiyanat ile kürlenmesiyle oluşan iki bileşenli yapıştırıcı türleridir. Emülsiyon Polimer İzosiyanat yapıştırıcılar ahşaptan ahşaba mükemmel bağlanma özellikleri göstermekte ve soğukta sertleştikleri, neme dayanıklı oldukları ve uzun presleme süreleri gerektirmedikleri için çok çeşitli ahşap ürünlerde kullanılmaktadır (Grøstad & Pedersen, 2010). Avrupa'da EPI yapıştırıcıları genellikle CLT elemanlarındaki tabakaları birbirine bağlamak için kullanılmaz. Bununla birlikte, Stora Enso gibi bazı üreticiler, üretimde parmak birleştirme için EPI yapıştırıcısını kerestelerin dar kenarlarına uygulayarak kullanmaktadır (Stora Enso, 2024).

MF/MUF yapıştırıcıları, Glulam ve CLT gibi ahşap kompozitler için kullanışlı, ısıyla sertleşen yapıştırıcılar olarak kabul edilmektedir (Zhou vd., 2017). Ancak, MF/MUF yapıştırıcıları oldukça kırılgan yapıya sahiptir ve içerdikleri formaldehit bileşeni hem insanlar hem de çevre için zararlı olabilir bu da onları endüstride gelecekte kullanım için önemli ölçüde daha az çekici hale getirmektedir (Johansson & Svenningsson, 2018).

Avrupa'da PUR yapıştırıcı, CLT üretiminde yaygın olarak kullanılan yapıştırıcıdır ve ortam sıcaklığında hızlı sertleşme süresi nedeniyle popülerdir. Genellikle bir-üç saat arasında süren kısa sertleşme süreci dışında yapıştırıcı, formaldehit içermemesi ve

uygulamadan önce diğer bileşenlerle karıştırılmasına ihtiyaç duymaması nedeniyle de popülerdir (Fontana vd., 2009).

#### 1.4. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)

Masif ahşabın gelişmesiyle birlikte CLT, inşaat sektörünün enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla kullanılan diğer geleneksel yapı malzemelerine kıyasla sürdürülebilir bir alternatif haline gelmiştir (Duan vd., 2022). Uluslararası Enerji Ajansı'na göre inşaat sektörü, tüm dünya genelinde enerji tüketiminin ve sera gazı (GHG) emisyonlarının önemli bir bileşeni haline gelmiş olup, dünya genelindeki toplam enerji tüketiminin üçte birinden fazlasını oluşturmakta ve toplam karbon emisyonlarının yaklaşık %40'ına katkıda bulunmaktadır (Duan vd., 2022). Binaların çevresel etkilerini belirlemek amacıyla yapı sektöründe 1990 yılından bu yana LCA uygulanmaktadır. LCA, bir ürünün, sürecin ve hizmetin çevresel etkilerini değerlendirmek için uluslararası kabul görmüş bir yöntemdir (ISO 2006a, 2006b). Geniş bir LCA literatürü, ahşap ürünlerin üretmek için işlevsel olarak eşdeğer, ahşap olmayan ürünlere göre çok daha az fosil bazlı enerji tüketildiğini göstermiştir (Werner & Richter, 2007; Sathre & González-García, 2014). Bu da yapılarda ahşap malzemelerin kullanılmasının büyük miktarlarda fosil bazlı emisyonları önlemekte, beton ve çelik gibi fosil bazlı ve fosil yakıtı yoğun malzemelerin üretiminden kaynaklanacak CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmaktadır. Ayrıca ağaç büyümesi sırasında atmosferden tutulan biyojenik karbon, dayanıklı ağaç ürünlerinde depolanmaktadır (Skog, 2008; Bergman vd., 2014; Nepal vd., 2016). Ahşap ürünlerin diğer malzemelerle ikame edilmesiyle ilişkili önlenen emisyonlar, bunların karbon depolama rolleriyle birleştiğinde, binalarda artan ahşap kullanımının önemli karbon faydalarıyla sonuçlanacağını göstermektedir. Özellikle masif ahşap yapının (CLT dahil) karbon faydaları birden fazla raporda belgelenmiştir (Buchanan vd., 2012; Milaj vd., 2017; Bowers vd., 2017; Chen vd., 2019; Puettmann vd., 2019; Liang vd., 2020; Pasternack vd., 2022).

Karbon emisyonlarını azaltma amaçlarına erişebilmek için, dünya genelindeki politikacılar, GHG emisyonlarında azalmayı teşvik eden ve/veya atmosferden karbon salınımını azaltan (karbon tutma ve depolama) faaliyetleri teşvik etmek için farklı karbon fiyatlandırma mekanizmaları uygulamaya başlamışlardır. Karbon fiyatlandırması, genellikle salınan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) için bir fiyat şeklinde olmak üzere, sera gazı emisyonlarının dış maliyetleri olan üç yaygın karbon fiyatlandırma mekanizması türü arasında (i) karbon

vergileri, (ii) emisyon ticaret sistemleri ve (iii) karbon denkleştirmeleri yer almaktadır (World Bank, 2024). Karbon vergileri, karbon yayıcı/üretici (örneğin fosil yakıt kullanan şirketler) tarafından ödenmekte ve böylece alternatif teknolojilere ya da daha az karbon yayan ürünlere geçişi teşvik edilmektedir. Birçok ülke, 2021'de vergi oranları CO<sub>2</sub> ton başına 0,08 ABD doları (Polonya) ile 137,24 ABD doları arasında değişen bir tür karbon vergisi uygulamıştır (World Bank, 2024).

Emisyon ticareti sistemleri (ETS) kapsamında, düzenleyiciler, kirleticiler için emisyon hedefleri belirlemektedir. Böylece bir ETS, emisyon tahsisatları için bir talep ve arz yaratarak piyasa karbon fiyatı belirlemektedir (Environmental Defense Fund., 2024). Üst sınır ve ticaret sistemi, emisyonlar üzerinde bir üst sınır veya mutlak sınırın belirtildiği yaygın ETS türüdür. Bu tür üst sınırın toplam miktarı daha sonra ödeneklere bölünür ve genellikle ücretsiz olarak veya açık artırma yoluyla yayıcılara dağıtılır. Verilen ödenek, bir yayıcının ne yayabileceğinin sınırını belirler ve herhangi bir ihlal için ceza uygulanmaktadır. Emisyon üst sınırı tipik olarak zamanla düşer ve yayıcılara emisyonlarını verimli ve uygun maliyetli bir şekilde azaltmaları için bir teşvik sağlamaktadır (Environmental Defense Fund., 2024). Tahsis izinlerinden daha az emisyon salan kuruluşlar, “fazla tahsisatlarını” ileride kullanmak üzere saklayabilir veya tahsisatlarından daha fazlasını salan diğer şirketlere satış yapabilmektedirler. ETS örnekleri arasında Ortak Uygulama (küresel), AB Emisyon Ticaret Sistemi (bölgesel), Çin Ulusal ETS (ulusal) ve California Emisyon Üst Sınırı ve Ticaret Programı (alt ulusal) yer alır. Bazı ETS, düzenlemeye tabi kuruluşların emisyon azaltma hedeflerini karşılamak için karbon denkleştirme kredilerinin kullanılmasına da izin vermektedir.

Rüzgar veya biyokütle gibi yenilenebilir enerji projeleri, enerji verimliliği iyileştirmeleri, depolama sahasından kaynaklanan metan emisyonlarının azaltılması, endüstriyel süreçlerdeki emisyonların düşürülmesi ile ağaçlandırma veya yeniden ağaçlandırma gibi ormancılık veya karbon depolamaya yönelik diğer uygulamalar ile karbon dengelemeleri düzenlenmektedir. (Fernholz vd., 2021). Karbon denkleştirme mekanizmalarından alınan krediler, düzenlemelere uymak veya endüstri veya şletmelerin gönüllü sera gazı azaltma hedeflerini karşılamak için satılabilir veya satın alınabilir (World Bank, 2024). Amerika Birleşik Devletleri'nde en popüler (rapor edilen hacim) ve değerli (toplam dolar değeri) karbon denkleştirme kredileri, dikili ağaçlardaki karbon depolaması dikkate alınarak ormanları içeren kredilerdir (Forest Trends' Ecosystem Marketplace, 2021).

Bu programlar genellikle hasat edilen ağaçlara veya ağaç ürünlerine kredi vermez (Climate Action Reserve, 2024).

Dünya genelinde birçok ülke, eyalet ve yerel yönetim, masif keresteyi inşaat sektörü emisyonlarını azaltmanın bir yolu olarak doğrudan veya dolaylı olarak tanıyan politikalar uygulamaktadır. Örneğin, 2017 Buy Clean California Yasası, Genel Hizmetler Departmanının çeşitli inşaat malzemeleri için kabul edilebilir maksimum küresel ısınma potansiyelini (GWP) belirlemesini zorunlu kılmaktadır (California Department of General Services, 2024). Bu hüküm, daha düşük karbon emisyon seviyelerine veya malzeme üretimi, nakliyesi ve yapımından kaynaklanan karbon emisyonlarına sahip ahşap malzeme üreticilerini ödüllendirecektir (ThinkWood, 2023d). Benzer şekilde, Avustralya devleti, konut dışı binalarda ve konut binalarında düşük karbon etkili mühendislik ürünü ahşap ürünler kullanan uygun projeleri finanse etmek amacıyla, masif ahşap inşaatı teşvik eden bir programa 300 milyon \$ yatırım yapmayı planlanmaktadır (PFA, 2024). Son zamanlarda ABD hükümeti, ABD Tarım Bakanlığı'nın İklim Akıllı Mallar için Ortaklık Programı (USDA, 2022; NEFF, 2024) aracılığıyla iklim açısından akıllı masif ahşap inşaatı ilerletmek ve ağaç ürünleri pazarlarını genişletmek için milyonlarca dolarlık fon sağladığını duyurmuştur.

Diğer yapı malzemeler yerine ahşabı kullanmanın daha yüksek karbon depolama ve daha düşük karbon emisyonları sağladığı kabul edilmektedir. ABD'nin Georgia eyaleti, tam olarak uygulandığında, geliştiricilerin hem ahşapta depolanan karbon hem de diğer malzemeler yerine ahşabı kullanmaktan kaynaklanan karbon emisyonu tasarrufları için binalarda ahşap kullanarak karbon ofsetleri üretmelerini sağlayacak olan House Bill 1015'i onaylamıştır. (Totten, 2020).

### **1.5. Kalite ve Direnç Sınıflarına Göre Kereste Sınıflandırması**

Hem ülkemizde hem de dünyada farklı kalite sınıflarında kereste üretilmekte olup, kereste kalitesi CLT maliyetini etkileyen en önemli faktörlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Günümüzde yapılan kereste kalite sınıflandırmaları incelendiğinde, birçoğu ağaç malzemeyi 3 sınıfa ayırmaktadır. Ancak, sınıflandırma türü, ahşap malzemenin kullanım amacı ve sınıflandırma standardının oluşturulma hedeflerine göre farklılık göstermektedir (Görgün, 2013). Ülkemizdeki kereste sınıflandırma standartları incelendiğinde; TS 1265 (2019) standardına göre iğne yapraklı ağaçlardan elde edilen yapı

kerestelerinin sınıfları standartta belirtilen özelliklere göre I. sınıf, II. sınıf ve III. sınıf olmak üzere üç kalitede sınıflandırılmaktadır. Bu üç sınıfın dışındaki keresteler değerlendirme dışı olarak tanımlanır. TS EN 14081-1+A1 (2019) standardında ahşap yapılar-dikdörtgen kesilmiş yapı kerestelerinin mukavemet sınıflandırması, TS EN 338 (2016) Avrupa normu standardında belirtilen direnç sınıflarına atıf yapılarak gerçekleştirilmektedir. TS EN 338 (2016) Avrupa standardına göre, iğne yapraklı ağaç türleri için 12 sınıf (C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45, C50), yapraklı ağaç türleri için ise 8 sınıf (D18, D24, D30, D35, D40, D50, D60, D70) olarak sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırmalar, kerestenin kalitesini belirleyen ve satış fiyatını etkileyen en önemli faktörler arasındadır. Literatür araştırmalarında, Avrupa'da CLT üretimi yapan büyük firmaların kullandıkları kerestelerin TS EN 338 (2016) standardına göre sınıflandırıldığını gösteren bir çalışmada, genellikle C24 direnç sınıfına sahip kerestelerin tercih edildiği belirtilmiştir. (Wiruszewski & Mazela, 2017). Bunun dışında, Avusturya'dan Binderholz; en az C18'e kadar, Stora Enso C16 ve C30, Thoma Holz GmbH; C16, İsveç'ten Martinsons; en az C14'e kadar, İsviçre'den ise Lignotrend AG; C20 direnç değerlerini de C24'ün yanında kullanabilmektedir (Wiruszewski & Mazela, 2017). Literatürde yapılan çalışmalarda, CLT üretiminde genellikle iğne yapraklı ağaçların tercih edildiği, direnç değerleri arasında bir kıyaslama yapılmadığı ve analizlerin çoğunlukla tek bir grup üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Bu grubun ise genellikle C24 direnç sınıfı olduğu tespit edilmiştir (Hassanieh vd., 2017; Reynolds vd., 2017; Follesa & Fragiancomo, 2018; Bradner, 2018; Turesson vd., 2019; Lie vd., 2020). Bunların dışında, C16 (Kippel vd., 2014), C18 (Soriano vd., 2016; Luengo vd., 2017), C22 (Guo vd., 2017) ve C30 (Hadigheh & Dias da Costa, 2020) direnç sınıflarının da tercih edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, bazı çalışmalarda tek bir CLT panelinin üretiminde iki farklı direnç sınıfına ait kerestelerin birlikte kullanıldığı belirtilmiştir (O'Dowd vd., 2016).

Ahşap hammaddesinin kalitesinin değerlendirilmesi ve sınıflandırılması, verimi maksimize etmede önemli bir etkiye sahiptir. Artan verim için finansal, niceliksel ve aynı zamanda ekolojik nedenler önemlidir. Ahşap çok çeşitli fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikler ve aralarındaki korelasyonlar türden türe değişir ve büyüme koşullarına bağlıdır. Yapısal ahşap üretildiğinde, yapısal güvenliği ve malzemenin ekonomik kullanımını sağlamak için temel özelliklerin değerlendirilmesi gerekmektedir.

Ahşabı değerlendirmek için çeşitli yöntemler vardır. Değerlendirilen malzemenin tahribat derecesine göre bunlar: 1. tahribatlı, 2. tahribatsız, 3. yarı tahribatlı yöntemlere ayrılabilir. Ahşabın değerlendirilmesinde tahribatsız ve yarı tahribatlı yöntemler

daha önemlidir. (Ross vd., 1998). Buna karşılık, ahşap özelliklerini değerlendirmek için yarı tahribatlı teknikler, yapısal elemana göre tahribatsız, fakat çıkarılan numuneye göre tahribatlı test prosedürleri olarak tanımlanmaktadır (Kasal vd., 2003). Yarı tahribatlı yöntemler, daha fazla kullanımını etkilemeden malzemeye yalnızca kısmen zarar vermektedir. Esas olarak ahşap, kereste veya tarihi çatı yapılarının özelliklerini değerlendirmek için kullanılmaktadır (Kloiber vd., 2015).

Ahşap malzemenin direnç özelliklerini belirlemek için kullanılan tahribatsız tespit yöntemleri (nondestructive testing of wood), ahşabın fiziksel özelliklerini ölçmeyi ve herhangi bir hasar vermeden pratik bir şekilde test etmeyi amaçlayan tekniklerdir. Tahribatsız yöntemlerle, ahşabın birçok fiziksel ve mekanik özelliği herhangi bir zarar vermeden tespit edilebilmektedir (Bucur, 2003). Tahribatsız değerlendirme, bir malzemenin nihai kullanımını değiştirmeden fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve belirlenen özellikler kullanılarak uygun uygulamalara karar verilmesidir (Ross vd., 1998). Tahribatsız değerlendirmede en yaygın olarak kullanılan fiziksel ilkeler; akustik, ultrasonik, mikrodalga, görüntüleme, lazer ve X-ray olarak ifade edilmektedir.

#### **1.6. Tahribatsız Yöntemlerle Belirlenen CLT Panellerin Teknolojik Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar**

Katma değeri yüksek bir malzemenin maliyet etkin ve hızlı bir şekilde testlerinin yapılabilmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle popülaritesi hızla artan CLT'nin tahribatsız test yöntemleri ile araştırıldığı çalışmalar günden güne artmaktadır. Steiger vd. (2008) yaptıkları çalışmada tam ölçekli CLT panellerin elastik özelliklerini doğrudan üretim hattında belirlemek amacıyla, deneysel ve teorik modal analize dayanan tam otomatik, tahribatsız bir prosedür geliştirilmiştir. Bir diğer çalışmada; CLT plakasının ortotropik davranışı eliptik bir model kullanılarak açıklanmış ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır (Santoni vd., 2017). Ettelaie vd. (2022) yaptıkları çalışmada Okalipütis nitens'ten (E. nitens) farklı sınıf kombinasyonlarına sahip CLT panel konfigürasyonunun mekanik özelliklerini değerlendirmek ve CLT panellerin özelliklerini tahmin etmek için bu yöntemlerde akustik dalga hızı (AWV) aracılığıyla dinamik elastikiyet modülünü (MOEdyn) belirlemiştir. Concu vd. (2016) yapmış oldukları araştırmada, Çapraz Lamine Ahşap panellerin bazı mekanik özellikleri hakkında bilgi veren Sonik Testin güvenilirliği, panellerin ahşap türü, katman sayısı ve katman konfigürasyonu ile ilişkili olarak araştırmıştır.

Concu vd., (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, CLT panellerindeki yapıştırma başarısızlıkları ve kusurları tespit etmek için Ultrasonik Test (UT) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, farklı konfigürasyonlara sahip (uzunluk, katman kalınlığı, katman sayısı, ahşap türleri) birkaç CLT paneline UT uygulanmıştır. Her panel için, uzunlamasına stres dalgasının hızının (V) birkaç yol boyunca ölçülmesi sağlanmış ve V verisi sayısal olarak işlenerek her panel için yatay düzlemde hız dağılımı iso-hız eğrileriyle grafiksel olarak temsil edilmiştir. Verilerin işlenmesiyle elde edilen düşük hız bölgeleri ile görsel olarak değerlendirilmiş yapışmayan alanlar arasındaki uyum değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Bu çalışma, CLT panellerinin kalite kontrolü için ultrasonik testlerin potansiyelini başarılı bir şekilde ortaya koymuştur.

Osuna-Sequera vd., (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, 18. yüzyıldan kalma mevcut bir yapıya ait 45 adet yapısal Salzmänn çamı kerestesinin yoğunluğunu tahribatsız yöntemlerle tahmin etmiştir. İğne penetrasyon direnci (NPR), vida çekme direnci (SWR) ve delik açma talaşı ekstraksiyonu (DCE) gibi tahribatsız test yöntemleri çalışmada kullanılmıştır. Yapılan tahribatsız testlerde, gerçek ve tahmin edilen yoğunluklar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda DCE, en iyi sonuçları verirken, NPR en düşük sonuçları vermiştir. Ölçüm sayısının artırılmasıyla belirleme katsayısında çok büyük bir iyileşme görülmemiştir: tek ölçüm için  $R^2 = 0,12-0,65$ , beş ölçüm için  $0,35-0,77$  ve on ölçüm için  $0,42-0,76$  arasında değişmiştir. Parçalar boyunca yoğunluk değiştiği için, daha iyi bir korelasyon sağlamak amacıyla Doğrusal (LM), Uca ve Merkeze (ECM) ve Merkezden Uca (CEM) yöntemleri olmak üzere üç farklı ölçüm sırası analiz edilmiştir. CEM, diğerlerine göre daha yüksek  $R^2$  değerleri elde edilmiştir ve en etkili sıra olmuştur. Yerinde yoğunluk tahmini yapılırken, CEM yöntemiyle en az 3 veya 4 ölçüm yapılması önerilmiştir.

Zhang vd., (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, CLT panellerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için transversal titreşim ve ultrasonik tahribatsız test yöntemlerini kullanılmıştır. Çalışmada, temassız lazer Doppler vibrometre (LDV) ve ivmeölçer ile yapılan ölçümler karşılaştırılmış ve LDV'nin hızlı ve etkili bir değerlendirme yöntemi olduğu gösterilmiştir. Nem içeriğinin artışının temel frekansı düşürdüğü ve sönüm oranını artırdığı belirlenmiştir, bu nedenle nem içeriğinin yaşlanma etkileriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, tahribatsız test yöntemlerinin CLT'nin üretim sonrası kalite kontrolü ve sahadaki yapısal teşhisi için etkili araçlar olduğu ortaya konulmuştur.

Llana vd., (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, geri dönüştürülmüş ahşabın, inşaat sektörü için CLT üretiminde kullanılma potansiyeli araştırılmıştır. Geri dönüştürülmüş ve yeni ahşaptan üretilmiş 12 adet CLT paneli tahribatsız olarak test edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, ahşap levhaların ve CLT panellerinin mekanik özelliklerini tahmin etmek için başarılı bir tahribatsız test yöntemi geliştirilmiştir.

Maithani vd. (2023), tarafından yapılan bir çalışmada, radiata çamı kerestelerinden poliüretan tutkalı kullanarak üretilen çapraz lamine kerestelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Akustik tabanlı tahribatsız test, tek tek plakaların yanı sıra tek tek katmanların dinamik elastikiyet modülünü (DMOE) belirlemek için gerçekleştirilmiştir.

CLT panellerin bazı teknolojik özellikleri üzerine yapılan diğer tahribatsız test çalışmalarına ait detaylar aşağıda verilmiştir.

Faircloth vd., (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, büyük ölçekli ve hızlı panel karakterizasyonu için endüstriyel ölçekte uygulanabilecek klasik titreşim analiz yöntemlerini geliştirmiştir. Geliştirilen bu tahribatsız yöntem ile ince veya kalın levhalar için eksenel elastik modüller ( $E_x$  ve  $E_y$ ) ve kayma modüllerini ( $G_{xz}$ ,  $G_{yz}$ ,  $G_{xy}$ ) tahmin etmeye olanak sağlanmıştır. Statik referans yöntemi ile tahribatsız yöntem arasındaki karşılaştırmalar,  $E_x$ ,  $E_y$  ve  $G_{xy}$  için sırasıyla %5,2, %7,9 ve %18,9'lık ortalama yüzdelik farklarla iyi bir tutarlılık göstermiştir. Ayrıca, doğru mekanik özelliklerin belirlenmesi için yeterli sayıda doğru frekans/modun tanımlanması gerektiği gözlemlenmiştir. Deneysel verilerden elde edilen mod şekilleri, sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılarak değerlendirme yönteminin, çevre koşulları, sınır koşulları, panel değişkenliği ve ağ çözünürlüğü gibi diğer etkilerden bağımsız olarak panelin özgül frekanslarını verdiği doğrulanmıştır.

Buck ve Hagman (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, CLT panellerinin malzeme özelliklerini sınıflandırmak için çok değişkenli görüntü analizi ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. CLT panelleri, yakın-kızılötesi (NIR) hiperspektral görüntüleme ve X-ışını bilgisayarlı tomografi (CT) analizleri ile tahribatsız teste tabi tutulmuştur. MIA kullanılarak fiber hizalanması ve düğüm tipi gibi ahşap özellikleri için prediktif modeller geliştirilmiştir. Modeller, yalnızca NIR kullanarak CLT yüzeyindeki malzeme özelliklerinin sınıflandırılabilceğini, X-ışını verisi ile birleştirildiğinde ise bu özelliklerin CLT hacmi boyunca daha hassas bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermiştir. Bu sonuçların, CLT'nin kimyasal ve fiziksel malzeme özelliklerini haritalama potansiyeline sahip olduğu, ürünün

üretim verimliliğini artırarak mühendislik ahşap ürünlerinin sürdürülebilirliğini iyileştirmeye yardımcı olabileceği ifade edilmiştir.

Tahribatsız test yöntemleri sayesinde, maliyet ve süre açısından verimli testler gerçekleştirilerek CLT malzemelerin mekanik özellikleri tespit edilebilmektedir. Ahşap malzemelerin üretim parametrelerinde değişiklik meydana geldiğinde, elde edilebilecek direnç değerlerinin belirlenmesi, çoklu parametrelerin değerlendirilmesi gerektiğinde zaman ve maliyet kaybına yol açan bir süreç haline gelebilmektedir. Bu aşamada, yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak mevcut testlerden elde edilen verilerin modellenmesi, farklı üretim parametrelerine göre ahşap malzemenin direnç özelliklerini tahmin etmeyi mümkün kılmaktadır. Literatür incelemelerinde, yapısal ahşap malzemelere yönelik optimizasyon çalışmalarında yapay sinir ağı (YSA) modellemelerinin etkili bir şekilde kullanıldığı tespit edilmiştir. Demir vd. (2023) kontrplak kaplı perde duvarların yanal yük altındaki yapısal performansı üzerinde bazı üretim parametrelerinin etkilerini incelemiş ve üretimdeki çivi boşluklarını YSA ile modelleyerek en uygun sonuçlara ulaşmıştır. Öztürk vd. (2022) benzer şekilde kompozit kontrplakların mekanik özellikleri üzerine pres parametrelerinin etkisini inceleyerek en yüksek direnç değerlerini veren optimum pres parametrelerini YSA modellemeleriyle ortaya koymuştur. Ayrıca, Demirkır vd. (2013) kontrplaklar için en yüksek yapışma direnci değerlerini veren bazı üretim parametrelerinin YSA modellemeleriyle optimum sonuçlarını belirlemiştir.

YSA, CLT panellerinin teknolojik özelliklerini tahmin etmek, kalite kontrol sağlamak ve üretim süreçlerini optimize etmek için güçlü bir araç olarak görünmektedir. Bu tür uygulamalar ile CLT üretiminde daha yüksek verimlilik ve sürdürülebilirlik sağlanabileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda tahribatsız testlerin etkinliğini artırarak ahşap yapıların güvenliğini ve dayanıklılığının artırılmasına katkı sağlayacaktır.

## 2. GEREÇ VE YÖNTEM

### 2.1. Materyal

#### 2.1.1. Ağaç Malzeme

Çalışmada ağaç türleri seçilirken, ahşap yapılarda genel olarak tercih edilen iğne yapraklı ağaçlar ve ülkemizde yetişen asli ağaç türlerimizin ormanlarda yayılış alanları dikkate alınmıştır. Günümüzde Ladin, Çam ve Gökmar olmak üzere üç ana iğne yapraklı ağaç türü, CLT panellerin ticari üretimi için ana hammadde olarak kullanılmaktadır (Srivaro vd., 2020). Bu nedenle, Orman Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Orman Atlası'ndaki (Orman Atlası, 2014) sıralamada ilk 5 sırada bulunan ve CLT üretiminde en fazla tercih edilen türlerden biri olan Doğu ladini (*Picea orientalis* L.), iğne yapraklı ağaç türü olarak seçilmiştir.

CLT üretimi için genelde iğne yapraklı ağaç türleri kullanılmakla birlikte ekonomik ve çevresel faktörler nedeni ile dünyada yapraklı ağaç türlerinin de tercih edilmeye başlandığı görülmektedir. Sakallı kızılbaş; Doğu Karadeniz Bölgesinde Doğu ladini, Doğu Karadeniz gökmarı, sarıçam ve Doğu kayını türlerinden sonra yayılış bakımından önemli bir yer tutmaktadır (Odabaşı vd., 2004; Mamikoğlu, 2015). Bu sebeple Karadeniz Bölgesinde geniş yayılım gösteren; hızlı büyüyen, idare müddeti kısa, düşük fiyatlı ve yapısal ahşap malzeme pazarında ülkemizin rekabet gücünü artırabilecek orman atlasındaki (Orman Atlası, 2014) yapraklı ağaçlar sıralamasında 4. sırada bulunan orman ağacı statüsündeki Sakallı kızılbaş (*Alnus glutinosa* subsp. *Barbata* (C.A. Mey. ) Yalt.) çalışmada kullanılan yapraklı ağaç türü olarak seçilmiştir.

Doğu ladin (*Picea orientalis* L.) odun özellikleri;

Ortalama yoğunluk değeri 0.406 g/cm<sup>3</sup> olup, 0,300-0,590 g/cm<sup>3</sup> değerleri arasında değişmektedir (Berkel, 1972). Gövde düzgün, ağaç boyu 40-50 m, çap ise 150-200 cm ye kadar çıkabilmektedir. Mekanik özelliklerinden liflere paralel basınç direnci ortalama olarak, 644 kg/cm<sup>2</sup>; eğilme direnci 870 kg/cm<sup>2</sup>; makaslama direnci 150 kg/cm<sup>2</sup>; yarıma direnci 8,6 kg/cm<sup>2</sup>, dir (Çalıova, 2011). Çatlamaya ve dönüklüğe eğilimi azdır. Binalarda yapı malzemesi olarak kullanılır. Radyal kesilmiş kaplama levha olarak, gemi direği, maden

direği, mekanik ve kimyasal odun hamuru, ambalaj talaşı, yonga ve lif levha yapımında kullanılmaktadır (Bozkurt, 1992).

Sakallı kızılgağaç (*Alnus glutinosa subsp. barbata* (C.A. Mey.) Yalt.) odun özellikleri;

Ordu ili Melet Irmağı'ndan Kafkasya'ya kadar olan Doğu Karadeniz Bölgesinde yayılmaktadır. 1000-1500 m yüksekliklerde çoğu kez saf, ya da diğer yapraklı ağaçlarla meşcere kurabilmektedir. Dağınık trahelidir (Anşın & Özkan, 1993). Ortalama yoğunluk değerleri ise; tam kuru yoğunluk değeri 0,486 g/cm<sup>3</sup>, hava kurusu yoğunluğu 0,53 g/cm<sup>3</sup>, hacim ağırlık değeri ise 0,407 g/cm<sup>3</sup> tür (Akyüz, 1998). Hafif, yumuşak, gevşek yapılı bir odunu vardır. Kolay yarılr. Çalışma sonucu çarpılma oranı azdır. Böcekler ve mikroorganizmalar tarafından kolay yıkımlanır, dayanıklı değildir (Merev, 1983). Çok iyi işlenir. Parlak, düzgün yüzeyler verir. Tutkalla iyi bağlantı kurar. Çok iyi boyanır ve iyi verniklenir (Şanivar & Zorlu, 1982). Masif, kontrplak ve kaplama halinde kullanılır. En yaygın kullanıldığı alan kontrplak üretimidir. Hava ile temas ettiğinde kırmızıya yakın bir renk alan odunları kolay işlendiği için tornacılıkta, mobilyacılıkta iskelet ve kaplama altı olarak kullanılır (Yaltırak & Efe, 1994). Kızılgağaç 1. verim sınıfında 20 yaşındaki genel ortalama artımı 21 m<sup>3</sup>/ha, genel hasılat 419 m<sup>3</sup>/ha, göğüs çapı 17,6 cm'dir. Kızılgağaç' ta artım 25-30 yaşlardan sonra azalmakta ve ileriki yaşlarda kalite kaybına uğramaktadır. Bu nedenle Kızılgağaçta idare süresi 25-30 yıl olarak ifade edilmektedir (Anonim, 1997). Doğu Karadeniz'deki Kızılgağaç meşcerelerinin 75 yaşına kadar Ladin, Sarıçam ve Karaçam türlerinin genel verimleri ve ortalama artırımlarına üstünlük sağladığı belirtilmektedir (Batu & Kapucu, 1995). Bu nedenle çalışma amacına uygun olarak kızılgağaç türü seçilmiştir.

### 2.1.2. Tutkal

Tek bileşenli poliüretan (PUR), melamin ve fenolik reçineler (fenol resorsin formaldehit (PRF)), emülsiyon polimer izosiyanat (EPI) reçineleri CLT üretiminde kullanılabilmektedir. PRF tutkalı Kuzey Amerika'da glulam üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ahşap I kirişleri ve laminasyon üretiminde EPI tutkalı kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Avrupa, Kanada ve Amerika' da CLT üretiminde yaygın olarak kullanılan tek bileşenli PUR tutkalı kullanılmıştır.

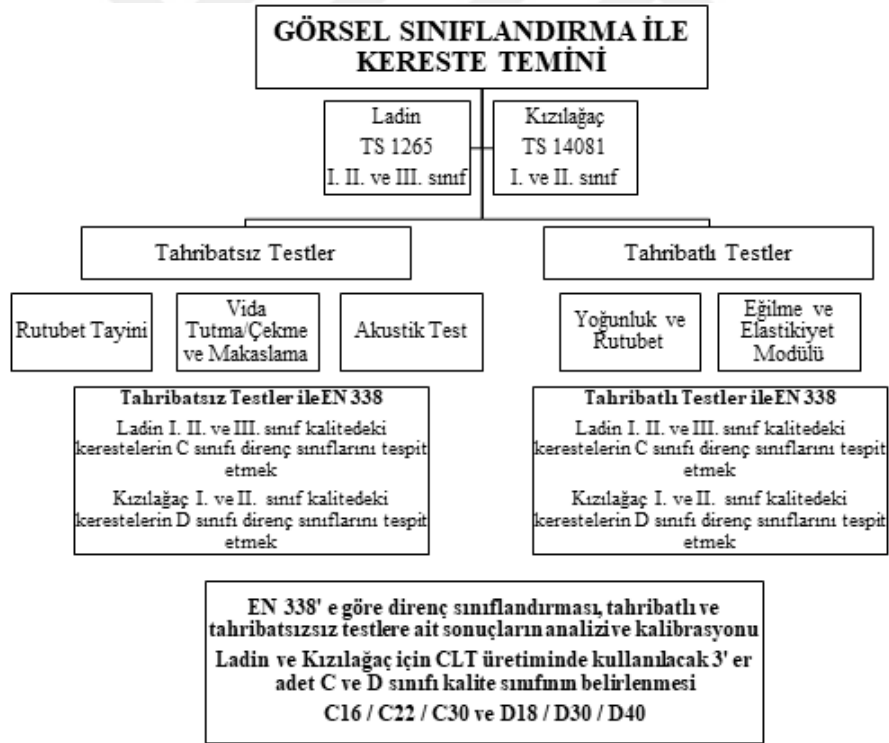
Poliüretan tutkalı;

Poliüretan tutkalı, çift bağlı alkolden ve uygun izosiyanattan üretilir. Su geçirmez özelliğe sahip olup, 150-200 g/m<sup>2</sup> uygulama oranı ile (yüzeyin pürüzlü veya pürüzsüz

olmasına bağlı olarak) su kontrplağı ve benzeri ahşap malzemeleri birbirine veya ahşabı metale, taş, betona, bazı sentetik maddelere vb. birçok malzemeye mükemmel bir şekilde yapıştırır. Kohezyon ve adezyon kuvveti oldukça güçlüdür. Ayrıca, asitlere, yağlara, kaynar suya ve mikroorganizmalara karşı dayanıklı bir tutkal türüdür. Çalışma kapsamında yapışma kalitesi DIN/EN 204 (2001)'e D4 olan suya ve sıcaklığa karşı yüksek direnç gösteren poliüretan esaslı, nem kürlü, tek bileşenli reaksiyon yapıştırıcısı kullanılmıştır.

## 2.2. Kereste Kalite Sınıflarının Belirlenmesi İş Akışı

Çalışmanın amacına uygun olarak CLT üretimde kullanılan kerestelerin ağaç türü, kalite sınıfı ve direnç özelliklerinin TS ve EN standartlarında belirtilen kalite ve direnç sınıflandırmasına göre görsel, tahribatlı ve tahribatsız yöntemler ile belirlenmesinde aşağıdaki Şekil 7'de gösterilen iş akış diyagramı uygulanmıştır;



Şekil 7. Kereste kalite sınıflarının belirlenmesi iş akışı

Ülkemizde iğne yapraklı ağaçlardan elde edilen yapı kerestelerinin satışında “Görsel Sınıflandırma” yapılarak TS 1265 (2019) standardına göre keresteler iyiden kötüye doğru I. sınıf, II. sınıf ve III. sınıf olmak üzere üç kalite sınıfına ayrılmaktadır. Yapraklı ağaç

keresteleri ise TS EN 14081-1+A1 (2019) standardında belirtilen görünüş özelliklerine göre TS EN 338 (2016) standardında verilen direnç özelliklerinden bir derecelendirme yapılarak iki kalite sınıfına ayrılmaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında görünüş özelliklerine göre 3 farklı kalite sınıfında ladin ve 2 farklı kalite sınıfından kızılâğaç keresteler temin edilmiştir. Nitekim yapılan bir çalışmada kerestelerin farklı bölgelerden temin edilmesinin kerestenin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine anlamlı bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Öztürk, 2012). Bu durumun, TS EN 338 (2016) standardındaki kereste direnç sınıfları üzerinde de etkili olacağı düşünülmektedir.

### **2.2.1. Kerestelerin Boyutlandırılması ve Rutubet Kontrolü**

Temin edilen her bir kereste 4 yüzeyinden de yaklaşık olarak kalınlıkta 2,5 mm, genişlikte 3,8 mm azalma olacak şekilde kereste planya makinesinde planya işlemine tabi tutulmuştur. CLT üretimi için kereste boyutlarının kontrolü; şerit metre, kumpas ve mikrometre ile yapılacak olup 120x10x2,5 cm ve 240x10x2,5 cm ölçülerinde boyutlandırılmış keresteler CLT üretiminde kullanılmıştır.

CLT üretiminde  $\%12\pm3$  kereste rutubeti, ürünün yapıştırılması sırasında doğru bağ kalitesini sağlaması açısından tercih edilmektedir. Bu nedenle, CLT üretiminde kullanılan keresteler tabakalar arasındaki rutubet farkı  $\%2$ ' yi geçmeyecek şekilde, klasik kurutma yöntemi ile kurutma yapan bir fırında  $\%12\pm3$  rutubet derecelerine kadar kurutulmuş halde temin edilmiştir. Kerestelerin temin edilmesinde rutubet kontrolü, direnç tipi rutubet ölçer ile yapılmıştır.

### **2.3. Kerestelerin Test Edilmesi**

Çalışma kapsamında, görünüş özelliklerine göre sınıflandırılan kerestelerin, CLT üretimi öncesi tahribatsız yöntemler ile testleri yapılarak TS EN 338 (2016) direnç sınıfının tayin edilmesi ve kullanım yerine göre optimum CLT kalitesini veren kereste sınıfları ve türleri belirlenmiştir.

Görünüş özelliklerine (TS 1265, 2019; TS EN 14081-1+A1, 2019) göre temin edilen keresteler bu aşamada; TS EN 338 (2016) yapısal ahşap direnç sınıflarına göre ladin için en az C16, kızılâğaç için ise en az D18 ve üzeri direnç sınıflarına ayrılmıştır. Görünüş özelliklerine (TS 1265, 2019; TS EN 14081-1+A1, 2019) göre temin edilen keresteler tahribatsız test cihazları ile test edilerek; TS EN 338 (2016) yapısal ahşap direnç sınıflarına

göre ladin için C16-C22-C30, kızılâğaç için ise D18-D30-D40 direnç sınıflarına ayrılmıştır. Bu şekilde piyasadan görünüş özelliklerine göre belirli kalite sınıflarına ayrılan kerestelerin TS EN 338 (2016) Avrupa normuna göre direnç sınıflandırılması yapılmıştır.

Tahribatsız değerlendirme yöntemleri ile tespit edilen direnç değerleri ve bu değerlere göre belirlenen direnç sınıflarının güvenilirliğini ortaya koyabilmek için, geleneksel tahribatlı test yöntemleri ile belirlenen gerçek direnç değerleriyle kıyaslama yapılmalı ve aralarındaki korelasyon ile regresyon denklemleri belirlenmelidir (Görgün, 2013). Bu amaçla TS 1265 (2019) ve TS EN 14081-1+A1 (2019) standartlarında belirtilen görünüş özelliklerine göre temin edilen kerestelere yapısal boyutta tahribatlı yöntemler uygulanarak mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Görünüş özelliklerine göre belirlenen her bir kalite sınıfından tahribatsız test yöntemleri ile belirlenen 6 direnç sınıfının mekanik testleri için 6' şar adet numune ve fiziksel testleri için 20'ser adet numune test edilmiştir.

### **2.3.1. Kerestelerin Tahribatsız Rutubet Tayini**

Rutubet kontrolü yapılmış olarak alınan keresteler, ağaç malzemenin higroskopik yapıda olmasından dolayı üretime kadar geçen süre içerisinde rutubet değişimine uğrayabileceğinden dolayı CLT üretim aşamasından önce tekrar rutubet kontrolünden geçilerek istenilen rutubet derecelerinde olup olmadığının kontrolü yapılmıştır.

Gann marka taşınabilir rezistans tipi rutubet ölçer, uzun iki adet elektrot 1/2 inç (yaklaşık 1,25 cm) derinliğe kadarki rutubeti ölçebilmektedir. Odun rutubet içeriği, basınç yükü değeri ve ultrasonik dalgaların hızını etkilemesinden dolayı ölçülmelidir (Benoit & Sandoz, 2007). Gerektiği zaman, ortam sıcaklığı ve ağaç türlerine göre cihaz okumaları ayarlanabilmektedir.

### **2.3.2. Kerestelerin Tahribatsız Vida Tutma/Çekme ve Makaslama Modülü Direncinin Belirlenmesi**

Fakopp firması tarafından geliştirilen bu tahribatsız vida tutma direnci ölçer (Şekil 8) cihazıyla söz konusu test örneklerinin vida tutma/çekme dirençleri belirlenmiştir. Ayrıca tespit edilen vida tutma/çekme direnç değerleri kullanılarak, test örneklerinin makaslama modülü dirençleri aşağıdaki formül sayesinde hesaplanmıştır.

$$G = 224 F_{Vida} + 210 \quad (1)$$

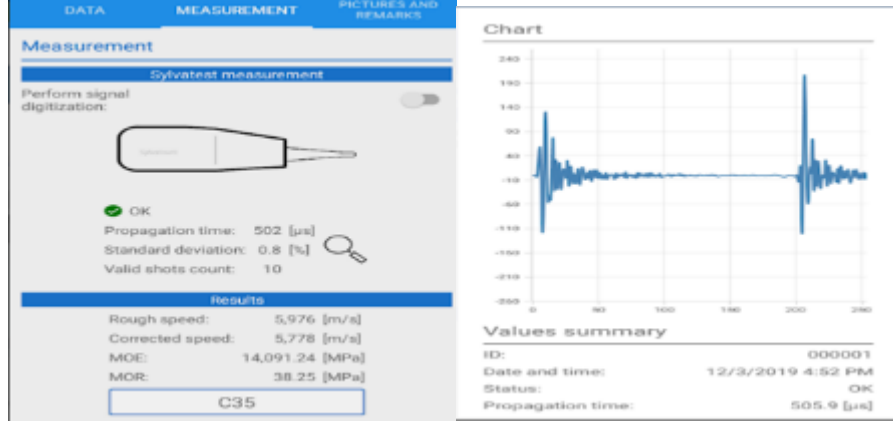
Burada; G: Makaslama modülü direnci (MPa),  $F_{Vida}$ : Vida tutma/çekme direnci (kN)



Şekil 8. Tahribatsız vida tutma/çekme direnç ölçer (Fakopp, 2024).

### 2.3.3. Kerestelerin Tahribatsız Akustik Yöntem ile Test Edilmesi

Akustik test cihazları günümüzde birçok farklı firma tarafından farklı isimlerle piyasada satılması ve kullanılmasına karşın çalışma prensipleri benzerdir. Bu çalışma kapsamında CBS-CBT firması tarafından geliştirilmiş Sylvatest 4 cihazı kullanılmıştır. Sylvatest 4, lif yönünde yaptığı ölçümler sayesinde ahşap bir yapısal bileşenin mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılabilen ideal bir cihazdır. Cihaz kerestelerin yanı sıra lamine ahşap vb. malzemelerin ölçümünü yapabilmektedir. Bu cihazın diğer bir avantajı dikili ağaç ve tomruklarda da odun kalitesi ve direnç özellikleri belirleyebilmesidir. Bu cihaz sayesinde kerestelerin ve CLT'lerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinin yanında, doğrudan TS EN 338 (2016) standardına göre kerestelerin direnç sınıfları da belirlenmiştir. Cihaz, iki dönüştürücü (verici ve alıcı) arasındaki ahşapta ultrasonik dalgaların uçuş süresini ölçerek, yazılım aracılığıyla eğilme direnci ve elastikiyet modülünü doğrudan hesaplamakta ve elde edilen verileri grafiğe dönüştürmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Akustik test cihazı yazılım verileri

#### 2.3.4. Kerestelerin Tahribatlı Yoğunluk, Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülünün Belirlenmesi

Kerestelerin yoğunluk, eğilme direnci ve elastikiyet modülü testleri büyük boyutlarda TS EN 384+A2 (2022)'de atıf yapılan TS EN 408+A1 (2014) standardına göre yapılmıştır.

#### 2.3.5. Kerestelerin Tahribatlı Liflere Paralel Basınç Direnci ve Makaslama Direncinin Belirlenmesi

Kerestelerin liflere paralel basınç direnci ve makaslama direnci testleri TS EN 384+A2 (2022) – TS EN 338 (2016)'e göre yürütülmüştür.

#### 2.3.6. TS EN 338'e Göre Direnç Sınıflandırması, Tahribatlı ve Tahribatsız Testlere Ait Sonuçların Analizi ve Kalibrasyonu

Ülkemizde TS 1265 (2019) ve TS EN 14081-1+A1 (2019) standartlarına atıf yapılarak bir kalite sınıflandırması kereste satış aşamasında yapılmasına ve fiyat politikası buna göre belirlenmesine rağmen TS EN 338 (2016) standardına göre bir sınıflandırma yapılmamaktadır. Bu çalışmada CLT üretiminde kullanılan kerestelere yapılan görsel sınıflandırma ile tahribatlı ve tahribatsız testler sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel analizi yapılarak birbirleri ile olan ilişkileri ortaya konulmuştur. Böylelikle görsel sınıflandırma ile temin edilen kerestelerin tahribatlı ve tahribatsız testler sonucunda TS EN 338 (2016)'e göre direnç sınıflarının nasıl dağılım gösterdiği ortaya konulmuştur. Literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında CLT üretiminde iğne yapraklı ağaçlar için C30 üzeri kereste direnç sınıflarının yeterli teknolojik özellikleri sağladığı tespit edilmiştir.

Ayrıca TS EN 338 (2016) standardında C45 ve C50 direnç sınıfında kerestenin zor bulunan sınıflar olduğu ifade edilmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında gruplar seçilirken C30 standardına kadar ilgili standart da verilen sınıflandırma sıralaması açısından eşit aralıklı olarak direnç sınıfı seçimi yapılmıştır. Bunun sonucunda ladin için C16 ve kızılğaç için D18 ve üzeri 3'er direnç sınıfı seçilmiştir. Seçilen direnç sınıfları çalışma amaçlarına ve YSA ile yapılacak modellemeye uygun olduğu düşünülen ladin için C16-C22-C30, kızılğaç için ise D18-D30-D40 olarak belirlenmiştir.

Görsel sınıflandırma yapılmış 5 farklı kalite grubu (Ladin I. II. ve III. sınıf, Kızılğaç I. ve II. sınıf) içerisinde çalışma amacına uygun olarak gerekli olan kereste sayısına ulaşıncaya kadar tahribatsız testler yapılarak 6 farklı direnç sınıfı (iğne yapraklı: C16, C22, C30 ve yapraklı: D18, D30, D40) grupları belirlenmiştir. 6 farklı direnç sınıfı için Tablo 1 de görüldüğü gibi tahribatlı testler yapılarak sonuçlar tahribatsız testler ile karşılaştırılmıştır.

Çalışma kapsamında 30 levha grubu için endüstriyel koşullarda perde duvar analizi için 240x240x7,5 cm ebatlarında ve CLT duvarların mekanik ve fiziksel testleri için 240x120x7,5 cm ebatlarında 1' er adet olmak üzere toplamda 60 adet CLT panel üretimi gerçekleştirilmiştir. 240x240x7,5 cm ebatlarında 1 adet CLT paneli üretimi için 72 adet olmak üzere toplam 2160 kereste, 240x120x7,5 cm ebatlarında 1 adet CLT paneli üretimi için 36 adet kereste olmak üzere 1080 kereste kullanılmıştır. Toplamda 3240 adet kereste çalışma kapsamında üretilen CLT' ler için kullanılmıştır. Bu kerestelere uygulanan testler için oluşturulan deneme deseni Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Keresteler üzerine uygulanan testler için deneme deseni

| Deney Tipi          | Deney/Test/Analiz Adı                          | Kullanılacak cihaz/deney düzeneği         | Uygulanacak standart/ cihaz adı | Örnek Sayısı                      | Grup Sayısı                   | Toplam Test Sayısı                 |
|---------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Tahribatsız Testler | Rutubet tayini                                 | Rezistans tipi rutubet ölçer              | Gann                            | Her bir keresteye 3 ayrı noktadan | 5 farklı görsel kalite sınıfı | Üretimde kullanılan tüm keresteler |
|                     | Vida tutma/çekme ve makaslama modülü direnci   | Tahribatsız vida tutma/çekme direnç ölçer | Fakopp                          |                                   |                               |                                    |
|                     | Yoğunluk, eğilme direnci ve elastikiyet modülü | Akustik test cihazı                       | Sylvatest 4 (TS EN 338, 2016))  | Her bir keresteye                 |                               |                                    |
| Tahribatlı Testler  | Eğilme direnci                                 | Dört nokta tahribatlı deney cihazı        | TS EN 384+A2 (2022)             | 6                                 | 6 farklı direnç sınıfı        | 36                                 |
|                     | Elastikiyet modülü                             |                                           | TS EN 384+A2 (2022)             | 6                                 |                               | 36                                 |
|                     | Makaslama direnci                              | Universal test cihazı                     | TS EN 384+A2 (2022)             | 6                                 |                               | 36                                 |
|                     | Basınç direnci                                 |                                           | TS EN 384+A2 (2022)             | 6                                 |                               | 36                                 |
|                     | Yoğunluk                                       | Hassas terazi, kumpas ve mikrometre       | TS EN 384+A2 (2022)             | 20                                |                               | 120                                |

Keresteler üzerine yapılan tahribatsız test yöntemleri ile tahribatlı test yöntemlerinden elde edilen gerçek direnç değerlerinin kıyaslanarak aralarındaki korelasyonun ve regresyon denklemlerinin ortaya konulması amacı ile yoğunluk, elastikiyet modülü, eğilme ve makaslama direnç değerleri kullanılmıştır. TS EN 384+A2 (2022) standardına göre TS EN 338 (2016)'de verilen direnç sınıfları ve ağaç türleri ile ilgili numune ve sınıflandırma için yalnızca üç karakteristik değere ihtiyaç duyulduğu belirtilmekte olup, çalışmada eğilme direnci, elastikiyet modülü ve yoğunluk değerleri bu amaç için kullanılmıştır. Tablo 1'de görülen basınç direnci testi ise ilave mekanik direnç testi olarak seçilmiştir.

#### 2.4. Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Üretimi

CLT üretimi, duvar inşasında kullanılabilecek büyük boyutlu levhaların üretilebileceği bir tesiste gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle üretimin laboratuvar tipi pilot ölçeklerin yerine, endüstriyel üretim koşullarının uygulandığı bir işletmeden hizmet alımı şeklinde yapılması çalışma amacına daha uygun olarak görülmüştür. Bu amaçla, CLT üretimi çalışma amacına uygun bir şekilde hizmet alımı yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

### 2.4.1. Tutkallama ve Taslak Oluşturma

Tutkallama işlemi; genişliği 15 cm olan tutkal sŭrme merdaneleri ile yapılmıştır (şekil 10). Kullanılacak merdanelerin haznesinde dozajlama silindiri bulunmasından dolayı yŭzeyeye istenilen miktarda tutkal yivli silindirler yardımı ile eşit olarak sŭrŭlebilmektedir. Kereste yŭzeylerine 160 g/m<sup>2</sup> tutkal çözeltisi sŭrŭlmŭřtŭr. Yŭzeyeye sŭrŭlen tutkal miktarı; tutkallama öncesi ve sonrası yapılacak ağırlık kontrolleri ile belirlenmiştir.



şekil 10. Tutkal sŭrme merdanesi

Ŭretilen CLT panellerde taslak hazırlama işlemi tabakalar birbirine dik olacak şekilde yerleştirilmesiyle yapılmıştır. Taslak oluşturma sırasında, ŭretilecek malzemenin minimum çalışmasını sağlamak için bir tabakada kullanılacak kerestelerin enine kesitlerindeki yıllık halka ynŭne dikkat edilerek, kızılāęaç, ladin ve hibrit (kızılāęaç ve ladin kombinasyonu) taslaklar oluşturulmuştur (şekil 11). Ŭ tabakalı olarak hazırlanan taslak levhalar, presleme işlemine tabi tutulmuştur.



şekil 11. CLT panel taslak oluşturma ve enine kesit

### 2.4.2. Presleme

3 tabakalı CLT taslaklar, endŭstriyel koşullarda dikey ve yan presleme yapabilen hidrolik bir preste ladin ve hibrit için 0,8 N/mm<sup>2</sup>, kızılāęaç için 1,2 N/mm<sup>2</sup> basınçta soğuk

pres uygulanmıştır. Keresteler arasındaki boşluğu en aza indirebilmek için, dikey presleme ile birlikte 0,276-0,550 N/mm<sup>2</sup> arasında bir yan presleme uygulanmıştır.

Ağaç türü ve kereste kalitesine göre oluşturulan kombinasyonlar neticesinde üretimi yapılan 30 test grubu aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2. Ağaç türü ve kereste kalitesine göre oluşturulan test grupları

| Grup No | Ağaç Türü | Kereste Kalitesi | Tabaka Kombinasyonu |
|---------|-----------|------------------|---------------------|
| 1       | Ladin     | C16              | C16 - C16 - C16     |
| 2       |           | C22              | C22 - C22 - C22     |
| 3       |           | C30              | C30 - C30 - C30     |
| 4       |           | C16/C22          | C16 - C22 - C16     |
| 5       |           | C16/C22          | C22 - C16 - C22     |
| 6       |           | C16/C30          | C16 - C30 - C16     |
| 7       |           | C16/C30          | C30 - C16 - C30     |
| 8       |           | C22/C30          | C22 - C30 - C22     |
| 9       |           | C22/C30          | C30 - C22 - C30     |
| 10      | Kızılağaç | D18              | D18 - D18 - D18     |
| 11      |           | D30              | D30 - D30 - D30     |
| 12      |           | D40              | D40 - D40 - D40     |
| 13      |           | D18/D30          | D18 - D30 - D18     |
| 14      |           | D18/D30          | D30 - D18 - D30     |
| 15      |           | D18/D40          | D18 - D40 - D18     |
| 16      |           | D18/D40          | D40 - D18 - D40     |
| 17      |           | D30/D40          | D30 - D40 - D30     |
| 18      |           | D30/D40          | D40 - D30 - D40     |
| 19      | Hibrit    | C16/D18          | C16 - D18 - C16     |
| 20      |           | C22/D30          | C22 - D30 - C22     |
| 21      |           | C30/D40          | C30 - D40 - C30     |
| 22      |           | D18/C16          | D18 - C16 - D18     |
| 23      |           | D30/C22          | D30 - C22 - D30     |
| 24      |           | D40/C30          | D40 - C30 - D40     |
| 25      |           | C16/D30          | C16 - D30 - C16     |
| 26      |           | C16/D40          | C16 - D40 - C16     |
| 27      |           | C22/D40          | C22 - D40 - C22     |
| 28      |           | D18/C22          | D18 - C22 - D18     |
| 29      |           | D18/C30          | D18 - C30 - D18     |
| 30      |           | D30/C30          | D30 - C30 - D30     |

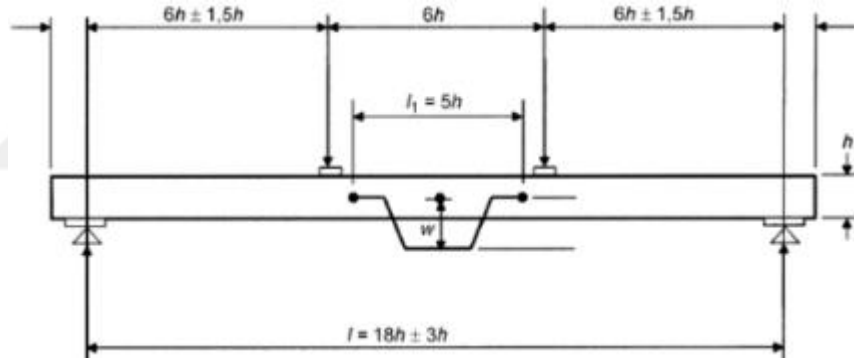
Her bir levha grubu için endüstriyel koşullarda perde duvar analizi için 240x240x7,5 cm ebatlarında 30 adet ve CLT duvarların mekanik ve fiziksel testleri için 240x120x7,5 cm ebatlarında 30 adet olmak üzere toplamda 60 adet CLT panel üretimi gerçekleştirilmiştir.

## 2.5. CLT Panellerin Test Edilmesi

### 2.5.1. CLT Panellerin Tahribatlı Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

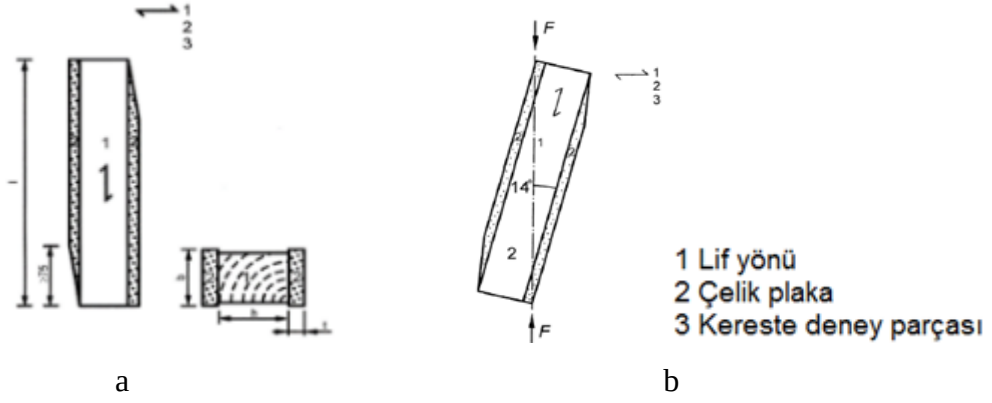
CLT panellerin eğilme direnci, elastikiyet modülü ve yoğunluk testleri, yapı kerestesi ve yapıştırılmış lamine kerestenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin tayininde kullanılan TS EN 408+A1 (2014) standardına göre yürütülmüştür. Eğilme direnci ve elastikiyet modülü testleri için her bir gruptan 6'şar adet deney örneği alınmıştır. Yoğunluk değerlerinin tespitinde 20 adet deney örneği kullanılmıştır. Elde edilen veriler istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Eğilme direnci ve elastikiyet modülü testleri Şekil 12'de gösterilen deney düzeneği ile TS EN 408+A1 (2014) standardına göre yürütülmüştür. CLT panellerin yoğunluk değerleri TS EN 384+A2 (2022)'de atıf yapılan TS EN 408+A1 (2014) standardına göre yapılmıştır.



Şekil 12. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülünün ölçümü için deney düzeneği (TS EN 408+A1, 2014).

Liflere paralel makaslama direnci Şekil 13'te gösterilen deney düzeneği ile TS EN 408+A1 (2014) standardına göre yürütülmüştür.



Şekil 13. a) Çelik plâkalara yapıştırılmış kereste deney parçasının görünüşü b) Yükleme düzeneği (TS EN 408+A1, 2014).

### 2.5.2. CLT Panellerin Tahribatsız Yöntemler ile Test Edilmesi

Mekanik ve fiziksel özelliklerin belirlenmesi; Üretilen CLT panellerin tahribatsız yöntemler ile direnç özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla CLT panellerin rutubet tayini ile vida tutma/çekme ve makaslama modülü direnci değerlerinin yanı sıra Sylvatest 4 cihazı ile akustik test yöntemlerine göre eğilme direnci, elastikiyet modülü ve yoğunluk analizleri de yapılmıştır. CLT panellerin tahribatsız olarak test edilmesinde kullanılan yöntemler “2.3.1. Kerestelerin Tahribatsız Rutubet Tayini, 2.3.2. Kerestelerin Tahribatsız Vida Tutma/Çekme ve Makaslama Modülü Direnci, 2.3.3. Kerestelerin Tahribatsız Akustik Yöntem ile Test Edilmesi” başlıkları altında verilmiştir.

CLT panellere yapılan tahribatlı ve tahribatsız testler sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel analizi yapılarak birbirleri ile olan ilişkileri ortaya konulmuştur. Yapılan analiz sonucunda ortaya koyulan ilişkinin anlamlı olması durumunda sonraki çalışmalar için tahribatsız test yöntemleri ile CLT panellerin teknolojik özelliklerinin ortaya konulmasında yarar sağlayacağı düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında 30 levha grubu için endüstriyel koşullarda perde duvar analizi için 240x240x7,5 cm ebatlarında ve CLT duvarların mekanik ve fiziksel testleri için 240x120x7,5 cm ebatlarında 1' er adet olmak üzere toplamda 60 adet CLT panel üretimi gerçekleştirilmiştir. CLT panellere uygulanan testler için oluşturulan deneme deseni Tablo 3' de verilmiştir.

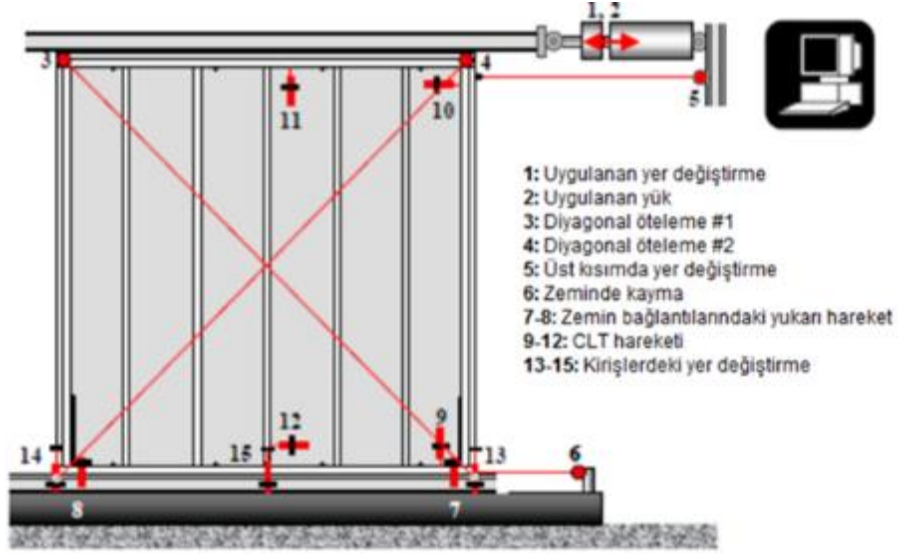
Tablo 3. CLT panellere uygulanan testler için deneme deseni

| Deney Tipi          | Deney/Test/Analiz Adı                        | Kullanılacak cihaz/deney düzeneği         | Uygulanacak standart/cihaz adı | Örnek Sayısı                      | Grup Sayısı | Toplam Test Sayısı |
|---------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------|--------------------|
| Tahribatsız Testler | Rutubet tayini                               | Direnç tipi rutubet ölçer                 | Gann                           | Her bir duvara 20 farklı noktadan | 30          | 600                |
|                     | Vida tutma/çekme ve makaslama modülü direnci | Tahribatsız vida tutma/çekme direnç ölçer | Fakopp                         |                                   |             |                    |
|                     | Yoğunluk                                     | Akustik test cihazı                       | Sylvatest 4 (TS EN 338, 2016)  |                                   |             |                    |
|                     | Eğilme direnci                               |                                           |                                |                                   |             |                    |
|                     | Elastikiyet modülü                           |                                           |                                |                                   |             |                    |
| Tahribatlı Testler  | Eğilme direnci                               | Dört nokta tahribatlı deney cihazı        | TS EN 408+A1 (2014)            | 6                                 | 30          | 180                |
|                     | Elastikiyet modülü                           |                                           | 6                              | 180                               |             |                    |
|                     | Perde Duvar Analizi                          | Universal test cihazı                     | ASTM E 72 (2014)               | 1                                 |             | 30                 |
|                     | Basınç direnci                               |                                           | TS EN 408+A1 (2014)            | 6                                 |             | 180                |
|                     | Yoğunluk                                     | Hassas terazi, kumpas ve mikrometre       | TS EN 408+A1 (2014)            | 20                                |             | 600                |

CLT Paneller üzerine yapılan tahribatsız test yöntemleri ile tahribatlı test yöntemlerinden elde edilen gerçek direnç değerlerinin kıyaslanarak aralarındaki korelasyonun ve regresyon denklemlerinin ortaya konulması amacı ile yoğunluk, elastikiyet modülü ve eğilme direnç değerleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında CLT üzerine uygulanan Tablo 3’ de görülen diğer testler CLT panellerin kullanım amacına göre gösterecekleri performans ve kalite sınıfının belirlenmesinde kullanılacaktır.

## 2.6. CLT Duvarlar Üzerine Gerçekleştirilen Perde Duvar Analiz Testi

Perde duvar analizi testi ASTM E 72 (2014) standardına göre doğrusal yük altında uygulanmıştır. Kurulan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 14’ te verilmiştir. Perde duvar analiz testinde 20 Ton Kapasiteli Servo Hidro Yükleme Sistemi kullanılmıştır.



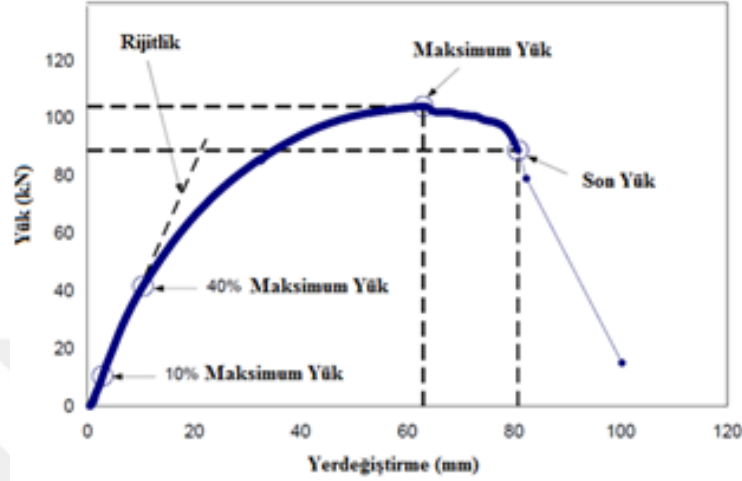
Şekil 14. Deneysel test düzeneği şematik gösterimi

ASTM E 72 (2014) standardında belirtilen yük uygulama prosedürüne göre gerçekleştirilen testlerin ardından her bir deney grubu için, maksimum yük taşıma ve maksimum yükteki yer değiştirme miktarları belirlenmiştir. Ayrıca 4 farklı noktaya yerleştirilen doğrusal değişken diferansiyel transformatörler (LVDT: Linear variable differential transformer) ile perde duvarların yer değiştirme miktarları tespit edilmiştir. CLT perde duvarlarda LVDT'lerin yerleştirildiği düğüm noktalarını Şekil 15' de gösterilmiştir.



Şekil 15. LVDT'lerin yerleştirildiği düğüm noktaları

Analiz sonuçlarına göre her bir grup için elde edilen grafikler incelenerek o grubu temsil edebilecek yük-yer değiştirme eğrileri belirlenmiştir. Belirlenen bu grafikler; örnek gruba ait maksimum yük ve bu yükteki yer değiştirmeyi ifade etmektedir (Şekil 16).



Şekil 16. Test sonucu elde edilen grafik (Pirvu, 2008).

Ayrıca grafik yardımıyla aşağıdaki özellikler de belirlenmiştir:

- Rijitlik: Max yükün %10-40'ı arasında bulunan eğrinin eğimi ile hesaplanmaktadır.
- Son Yük (Ultimate Load): Max yükün %80'idir.
- Son yük ve bu yüke göre belirlenen yer değiştirme noktasına kadar olan ve eğri altında kalan alanın değeri sistemin enerjisini vermektedir.

## 2.7. SAP 2000 Programı ile Perde Duvar Analizi

Deneysel Modal Analiz yöntemi, yapılarıdaki titreşimleri dikkate alarak frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerin deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan tahribatsız bir tekniktir. Bu yöntem, titreşim kaynağının tipine bağlı olarak ikiye ayrılır: Çevresel Titreşim Yöntemi ve Zorlanmış Titreşim Yöntemi. Çalışma kapsamında, dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılmış olup ilgili yönteme ait teorik formülasyonlar bu kısımda verilmiştir.

Deneysel Modal Analiz yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerde, seçilen yapının tipi ve frekans aralığına göre belirlenen ivme ölçerler, yerleştirildikleri yapıdaki titreşimleri ölçmek için kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda B&K 4506

tipi ivme ölçerler kullanılmıştır. Kullanılan ivme ölçere ait görsel Şekil 17’de, ivme ölçere ait özellikler Tablo 4’te verilmiştir.



Şekil 17. B&K 4506 tipi üç eksenli ivme ölçer

Tablo 4. B&K 4506 tipi üç eksenli ivme ölçere ait bazı özellikler

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| Model             | B&K 4506             |
| Hassasiyet        | 0,5 V/g              |
| Frekans Aralığı   | 0,3-2000 Hz          |
| Maksimum İvme     | $\pm 14g$            |
| Çalışma Sıcaklığı | -54 ile +100°C arası |
| Boyutlar          | 17 x 17 x 17 mm      |
| Toplam Kütle      | 18 gram              |

Veri toplama sistemi, veri toplama ünitesi ve bilgisayardan oluşmakta olup, veri toplama ünitesi ivme ölçerlerden gelen sinyalleri toplayarak bilgisayar programına aktarır ve sinyaller program arayüzü yardımıyla işlenir. Bu süreçte, ivme ölçerlerden veri toplama sistemine aktarılan ham veriler, tekrarlı ve tekrarsız titreşimler içerir. Yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için bu ham verilerin ayıklanması gerektiğinden, veri toplama sistemindeki sinyal koşullaması ile bu sorun giderilir. Bu işlem, genellikle düşük seviyeli bir sinyalin kalitesini artırmak, gürültü etkilerini azaltmak, istenmeyen sinyalleri filtrelemek, ivmeölçerlerin elektrik gücünü gerektiğinde ayarlamak veya ivmeölçerlerin davranışlarını kontrol etmek amacıyla yapılmaktadır (Altunışık, 2010; Sevim 2010). Sinyal koşullamanın önemli bir bileşeni, seçilen frekans ölçüm aralığının dışında kalan yüksek frekanslı sinyallerin filtrelenmesidir. Düşük hızda ölçüm yapılması durumunda, yüksek frekanslı sinyaller düşük frekanslıymış gibi algılanabilir ve bu da ölçüm hatalarına yol

açmaktadır. Çalışma çerçevesinde yapılan deneysel ölçümlerde, veri toplama birimi olarak B&K 3560 C model 17 kanallı cihaz tercih edilmiştir (Şekil 18).

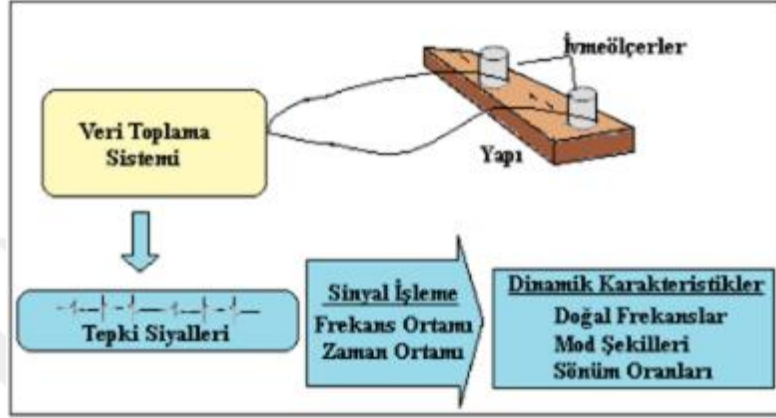


Şekil 18. B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi

Veri toplama ünitesinden sinyal koşullama yapıldıktan sonra yapı dinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için kaydedilen sinyaller bilgisayarlarda gerçekleştirilen özel yazılımlar yardımıyla işlenmektedir. Bu çalışma kapsamında, ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılması, ivmeölçerlerden alınan sinyallerin veri toplama cihazında depolanması ve depolanan sinyallerin sinyal işleme programına aktarılması için PULSE (PULSE, 2006) yazılımı, kaydedilen sinyallerin işlenmesi ve yapının dinamik özelliklerinin belirlenmesi için ise Operational Modal Analysis (OMA, 2006) yazılımı kullanılmıştır.

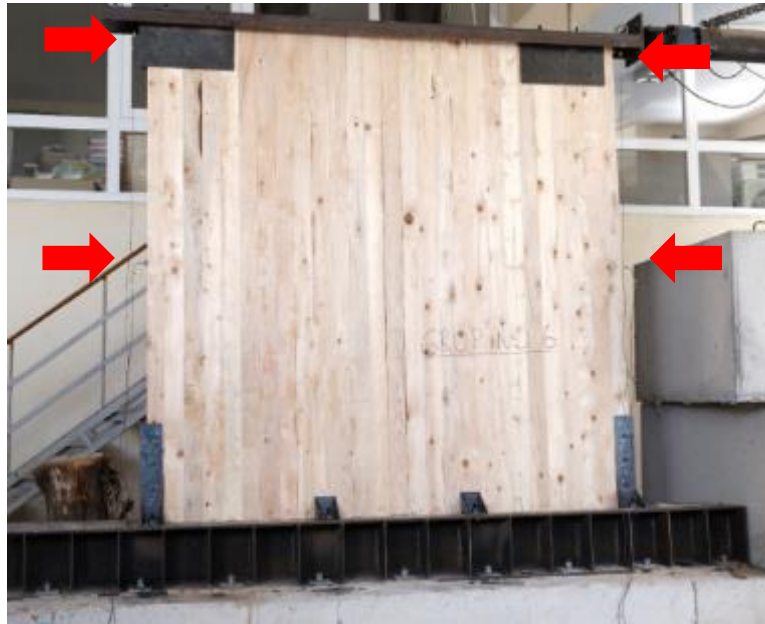
Deneysel Modal Analiz yönteminde yapının çevresel etki kuvvetleriyle titreştirildiği kabul edilip, yapının bu titreşime gösterdiği tepki ölçülürken, çevresel titreşim yönteminde etki kuvveti ölçülemediği için Etki Davranış Fonksiyonu belirlenemez ve bu nedenle yöntem literatürde Operasyonel Modal Analiz veya Sadece Tepki Modal Analizi olarak adlandırılmaktadır (Brincker vd., 2000). Bu yöntemde, yapıya etkiyen titreşimlerin genliği ve zamanla değişimi bilinmediğinden, yapının dinamik karakteristikleri frekans ve zaman tanım alanlarında kullanılan algoritmalarla belirlenmektedir. Frekans Tanım Alanındaki yöntemler başlıca Piklerin Seçilmesi Yöntemi, Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi, Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi ve Polimaks Yöntemleridir. Zaman ortamındaki yöntemler ise başlıca Rastgele Azalım Yöntemi,

Rekürsif Teknikler, En Büyük Olabilirlik Yöntemleri ve Stokastik Altalan Belirleme yöntemleridir (Ramos, 2007). Dinamik karakteristiklerin deneysel yöntemlerle belirlenmesi süreci, Şekil 19’da yer alan akış şemasıyla gösterilmiştir. Çalışma kapsamında Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi kullanılarak dinamik karakteristikler belirlenmiştir.



Şekil 19. Dinamik karakteristiklerinin deneysel yöntemlerle belirlenmesine ait akış şeması

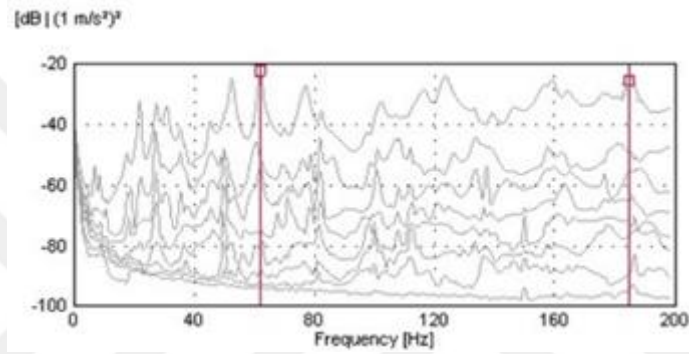
Çalışma kapsamında üretilen 30 farklı türde CLT duvarların dinamik karakteristik özelliklerinin belirlenmesi için deneysel modal analiz yöntemi ile ölçümler alınmıştır. İvmeölçer yerleşimine ait görsel Şekil 20’de gösterilmiştir.



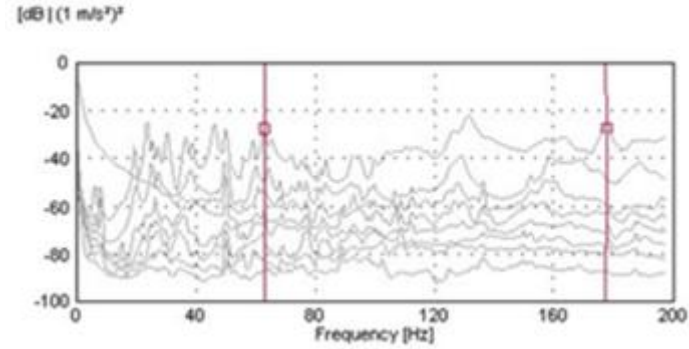
Şekil 20. CLT duvarlara ait ivme ölçerlerin yerleşimi

Deneysel titreşim testlerinde ham sinyaller 5dk'lık ölçümler gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Ham sinyallerin frekans tanım alanında işlenmesi için 0-400Hz frekans aralığı kullanılmıştır.

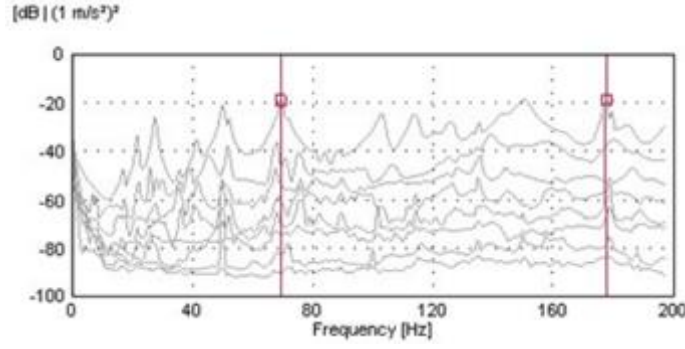
Çalışma kapsamında, 30 farklı CLT duvara ait dinamik karakteristiklerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla CLT duvara ait düzlem içi frekans ve mod şekilleri GFTAA Yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. GFTAA Yöntemi kullanılarak elde edilen spektral yoğunluk matrislerine ait görseller Şekil 21-23'te verilmiştir. Ayrıca dikkate alınan düzlem mod şekillerine ait görsel Şekil 24'te gösterilmiştir.



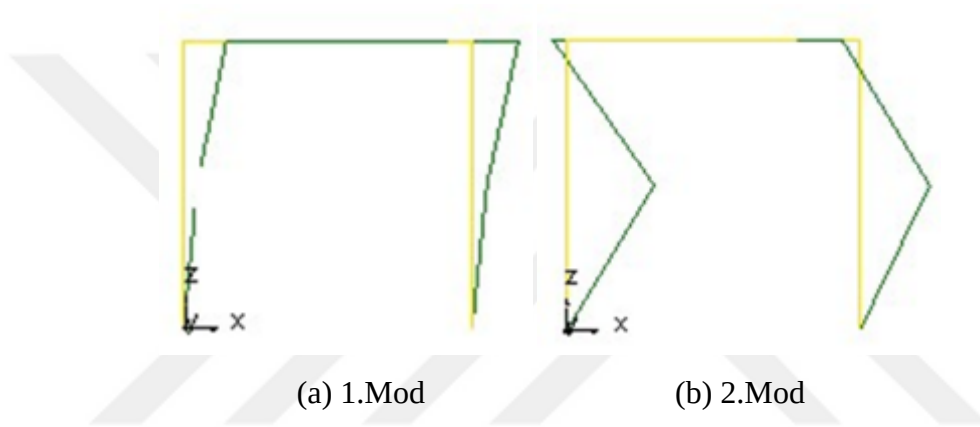
Şekil 21. 3 numaralı gruba ait CLT duvarın tahribatsız durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri



Şekil 22. 16 numaralı gruba ait CLT duvarın tahribatsız durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri



Şekil 23. 19 numaralı gruba ait CLT duvarın tahribatsız durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri



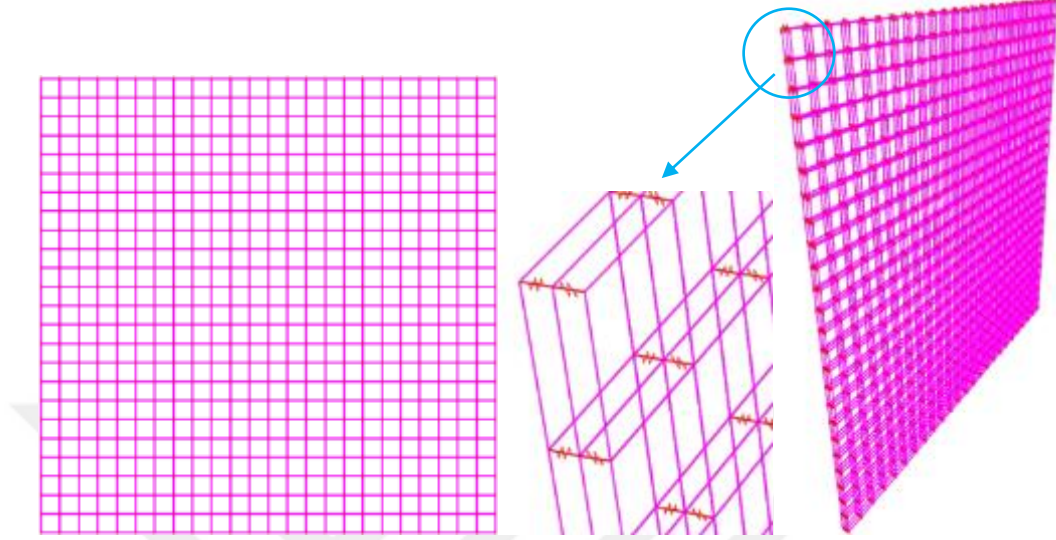
Şekil 24. CLT duvarlarla elde edilen mod şekillerine ait görsel; (a) 1. Mod ve (b) 2. Mod

Çalışma kapsamında CLT duvar modellerin sonlu eleman analizleri SAP 2000 programında gerçekleştirilmiştir. SAP 2000 programında geometrik modellerin oluşturulmasında sonlu eleman modelleri ile temsil edilmektedir. Modelde kullanılan elemanlara ait bilgiler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Alan elemanlar (levha): Bu elemanlar 2 boyutlu olarak gösterilmekte ve kabuk eleman gibi CLT panelleri temsil etmektedir.
- Link elemanlar (bağlantı/birleşim): Bu elemanlar paneller arasındaki tutkal gibi birleşimi temsil etmektedir.
- Mesnet elemanları (yay): Bu elemanlar oluşturulacak olan CLT duvarların altında yer alacak olan temeli temsil etmektedir.

30 adet CLT duvar modellerinin sonlu eleman modelleri oluşturulmuş olup modellere ait özellikler, detaylar ve görünüşler ortak olacak şekilde Şekil 25'te ve CLT duvarlara ait rijitlik özellikleri Eurocode 5'ten alınmış olup Tablo 5'te sunulmuştur. Diğer modeller için de aynı model düzeni kullanılmış olup, değişen ağaç türüne bağlı malzeme özellikleri, lif

yönleri ve duvarların altına modellenmiş olan yayların rijitlik değerleri her bir model için ayrı ayrı dikkate alınmıştır.



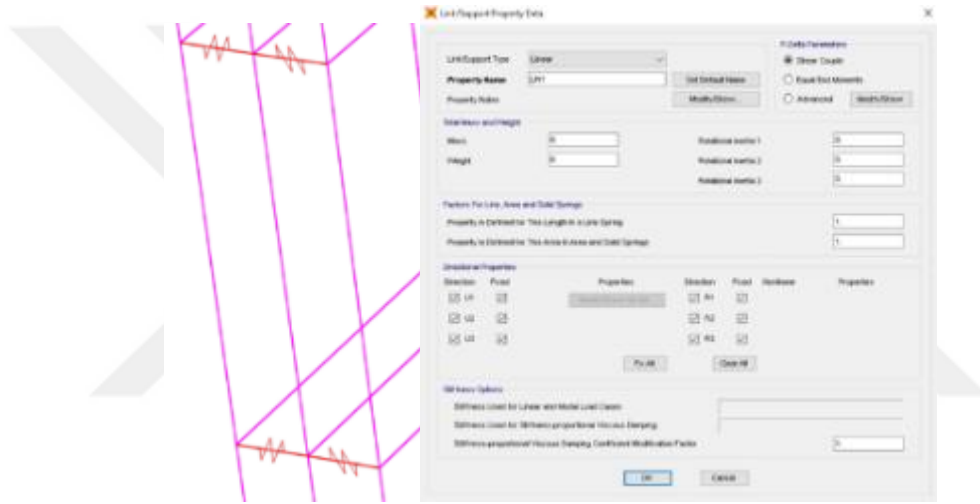
Şekil 25. CLT duvar modellerine ait ortak sonlu eleman modeli detayları ve görünüşleri

Tablo 5. Kullanılan ahşapların rijitlik özellikleri

| Ahşap Direnç Sınıfları | Rijitlik Özellikleri (kN/mm <sup>2</sup> )   |                                          | Ortalama Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
|                        | Ortalama Elastisite Modülü (liflere paralel) | Ortalama Elastisite Modülü (liflere dik) |                                        |
| C14                    | 7                                            | 0,23                                     | 350                                    |
| C16                    | 8                                            | 0,27                                     | 370                                    |
| C18                    | 9                                            | 0,3                                      | 380                                    |
| C20                    | 9,5                                          | 0,32                                     | 390                                    |
| C22                    | 10                                           | 0,33                                     | 410                                    |
| C24                    | 11                                           | 0,37                                     | 420                                    |
| C27                    | 11,5                                         | 0,38                                     | 450                                    |
| C30                    | 12                                           | 0,4                                      | 460                                    |
| C35                    | 13                                           | 0,43                                     | 480                                    |
| C40                    | 14                                           | 0,47                                     | 500                                    |
| C45                    | 15                                           | 0,5                                      | 520                                    |
| C50                    | 16                                           | 0,53                                     | 550                                    |
| D18                    | 9,5                                          | 0,63                                     | 570                                    |
| D24                    | 10                                           | 0,67                                     | 580                                    |
| D30                    | 11                                           | 0,73                                     | 640                                    |
| D35                    | 12                                           | 0,8                                      | 650                                    |
| D40                    | 13                                           | 0,86                                     | 660                                    |
| D50                    | 14                                           | 0,93                                     | 750                                    |
| D60                    | 17                                           | 1,13                                     | 840                                    |
| D70                    | 20                                           | 1,33                                     | 1080                                   |

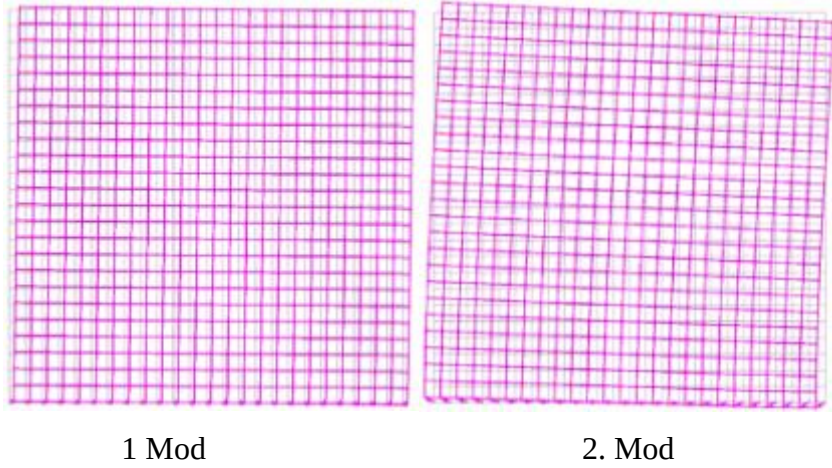
Çerçeve modelinin üç boyutlu sonlu eleman modeli, çubuk ve alan elemanlarıyla oluşturulmuş; ara bağlantı detayları ise link elemanlar, mesnet koşulları ise yay elemanlar

kullanılarak tanımlanmıştır. Laboratuvar ortamında deney düzeneği olarak tasarlanan betonarme sürekli temel üzerine ahşap çerçevenin mesnetlenmesini sağlamak amacıyla, H profili beton dökümünden önce ankrajlanmıştır. Burada yer alan temel ile CLT duvar arasındaki mesnetlenme şekli yay elemanlarla oluşturulmuştur ve her model için ayrı değerler girilmiştir. Sistemin düzlem dışı davranışını engellemek amacıyla çerçevenin tepe noktasına UPN160 çelik profili yerleştirilmiş olup, programda bu yük Mass Source şeklinde girilmiştir. Sonlu eleman modelinde toplam 1875 düğüm noktası, 1728 alan eleman ve 1250 link eleman bulunmaktadır. Modellere uygulanan link elemanların özellikleri Şekil 26’da gösterilmiştir.



Şekil 26. Link eleman özellikleri

Deneyisel çalışmalar sırasında, tepe noktasına uygulanan yüklemeler sonucunda çerçevenin tabanındaki belirli bölgelerde çekme kuvvetlerine bağlı olarak yukarı yönde açılmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca uygulanan yükler etkisiyle basınç oluşması halinde ankastre mesnetlenme, çekme halinde ise çivilerin rijitliklerine bağlı olarak açılmalara izin verilmiştir. Bunu bilgisayar ortamında modellemek amacıyla, CLT duvar modellerinin altına yay atama işlemleri yapılmıştır. Oluşturulan modelleri doğrulamak için, ilk olarak modal analizler yapılmış ve dinamik karakteristikler olarak adlandırılan frekans ve mod şekilleri tespit edilmiştir. Her bir model için yapılan analizler sonucunda düzlem içi iki adet frekans ve mod şekilleri elde edilmiştir. CLT duvarlara ait SAP 2000 programından elde edilen mod şekilleri Şekil 27’te gösterilmiştir.



Şekil 27. CLT duvarlara ait SAP 2000 programından elde edilen mod şekilleri

## 2.8. Yapay Sinir Ağları (YSA) Modellemesi

Çalışma kapsamında kalite özelliklerine göre temin edilmiş kerestelerin tahribatsız yöntemlerle belirlenen TS EN 338 (2016)'e göre direnç sınıfı değerleri, farklı kombinasyonlarla üretilen CLT paneller için kullanılmıştır. CLT panellerin üretiminde kullanılan ladin ve kızılğaç keresteler için 3 farklı direnç sınıfı belirlenmiştir. Bu direnç sınıfları belirlenirken, iğne yapraklı ağaçlar için TS EN 338 (2016) standardında belirtilen C45 ve C50 direnç sınıfı kerestelerinin bulunamayabileceği ifadesi ve CLT üretiminde kullanılan kereste direnç sınıfları üzerine yapılan literatür araştırması sonucunda C30 direnç sınıfı üzerindeki direnç sınıflarına ait kerestelerin kullanıldığına dair çalışma karşılaşılmaması dikkate alınmıştır. Bu sebeple grup seçimi yapılırken C30 direnç sınıfına kadar ilgili standart da verilen sınıflandırma sıralaması bakımından eşit aralıklı olacak şekilde direnç sınıfları (iğne yapraklı: C16, C22, C30 ve yapraklı: D18, D30, D40) belirlenmiştir. Çalışmanın YSA Modellemelerinde, TS EN 338 (2016) Standardına göre 3'er direnç sınıfından elde edilen deneysel veriler kullanılarak, standarttaki diğer direnç sınıfları için direnç ve rijitlik değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylece, çalışmada kullanılan direnç sınıfları dışındaki diğer direnç sınıflarına ait kerestelerle üretilecek CLT panellerin yapısal direnç özellikleri, deneysel olarak yapılmasına ihtiyaç duymadan maliyet ve zaman kaybı olmaksızın yüksek doğrulukla tahmin edilmiştir. Ayrıca, YSA analiz sonucu oluşturulan tahmin modelleri yardımıyla ladin, kızılğaç ve hibrit CLT paneller için optimum kereste direnç sınıfı kombinasyonları hem dış tabakalar hem de orta tabakalar için ayrı ayrı belirlenmiştir.

Bu çalışmanın YSA modellemesinde; ağaç türü, dış ve orta tabakalarda kullanılan kerestelerin TS EN 338 (2016) standardına göre direnç sınıfı değerleri temel işlem değişkenleri (girdi) olarak belirlenmiştir. Çıktı değişkenleri olarak ise CLT panellerin mekanik direnç özelliklerinden eğilme direnci, elastikiyet modülü ve liflere paralel makaslama direnci ile CLT perde duvarların rijitlik değerleri kullanılmıştır. Yapay sinir ağlarının oluşturulmasında, eğitilmesinde, test edilmesinde ve son olarak optimum değerlerin belirlenmesi işlemlerinde MATLAB paket programı tercih edilmiştir. Veriler, deneysel çalışmalardan tahribatlı olarak elde edilmiştir. Ağaç türünün, dış ve orta tabakada kullanılan kerestelerin TS EN 338 (2016) standardına göre direnç sınıflarının direnç özellikleri ve rijitlik değerlerine etkilerini incelemek üzere, deneysel veriler; eğitim verisi ve test verisi olarak ayrılmıştır. YSA eğitim süreci için bu veriler arasında, 20 örnek seçilmiştir, YSA'nın genelleme kabiliyetini doğrulamak için ise geriye kalan 10 örnek kullanılmıştır. Test işlemi sonucunda elde edilen tahmini değerler, gerçek değerlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Performans ölçütü olarak en yaygın kullanılan metriklerden ortalama karesel hatanın karekökü (Root Mean Square Error - RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (Mean Absolute Percentage Error - MAPE) dikkate alınmıştır. RMSE, 2 numaralı eşitlik; MAPE ise 3 numaralı eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır. En iyi tahmin performansını gösteren modeller, tahmin modelleri olarak seçilmiştir.

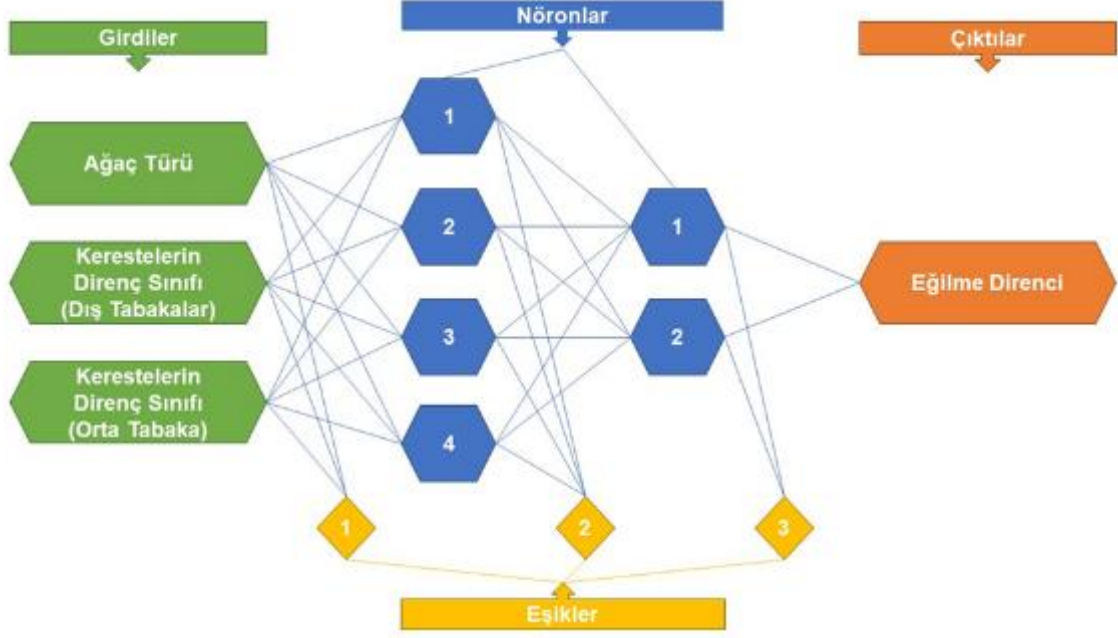
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - t_{di})^2} \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N \left| \frac{t_i - t_{di}}{t_i} \right| \right) \times 100 \quad (3)$$

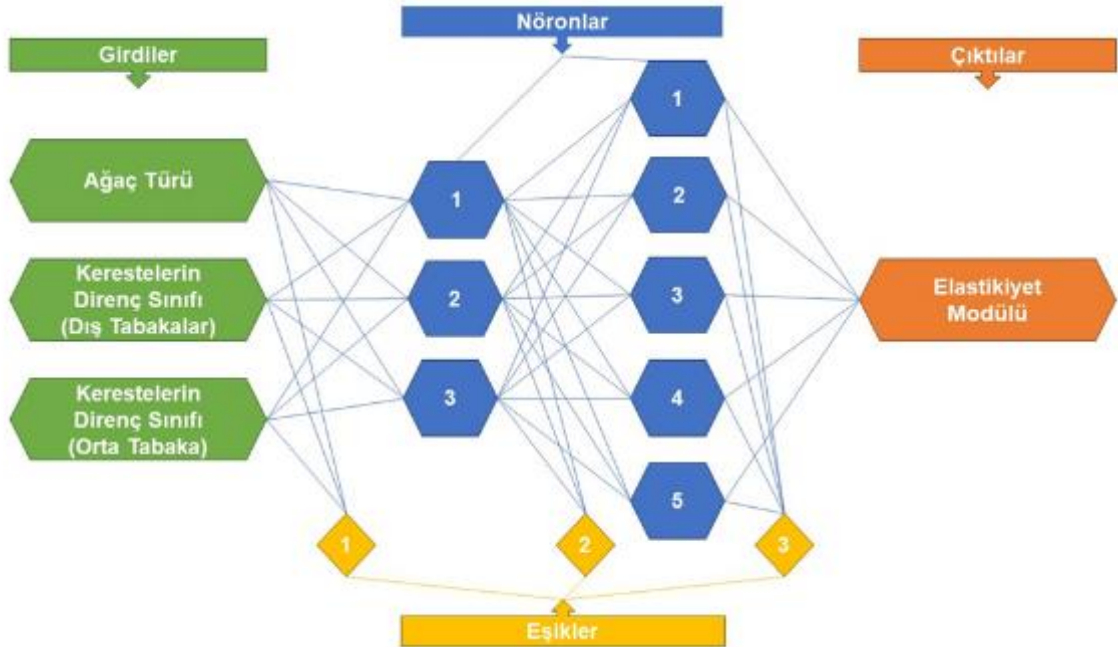
Burada gerçek değeri,  $t_i$ ; model tahmin değerini,  $t_{di}$ , terim sayısını ise  $N$  ifade etmektedir.

YSA analizlerinde yüksek performans özellikleriyle en iyi tahmin modelleri olarak belirlenen modellere ait ağ mimarileri çıktı değişkenlerine göre Şekil 28-31 arasında verilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere, en doğru ve kesin sonuçları tahmin eden modellerin ağ mimarileri 1 girdi katmanı, 2 gizli katman ve 1 çıktı katmanından oluşmuştur. Her gizli

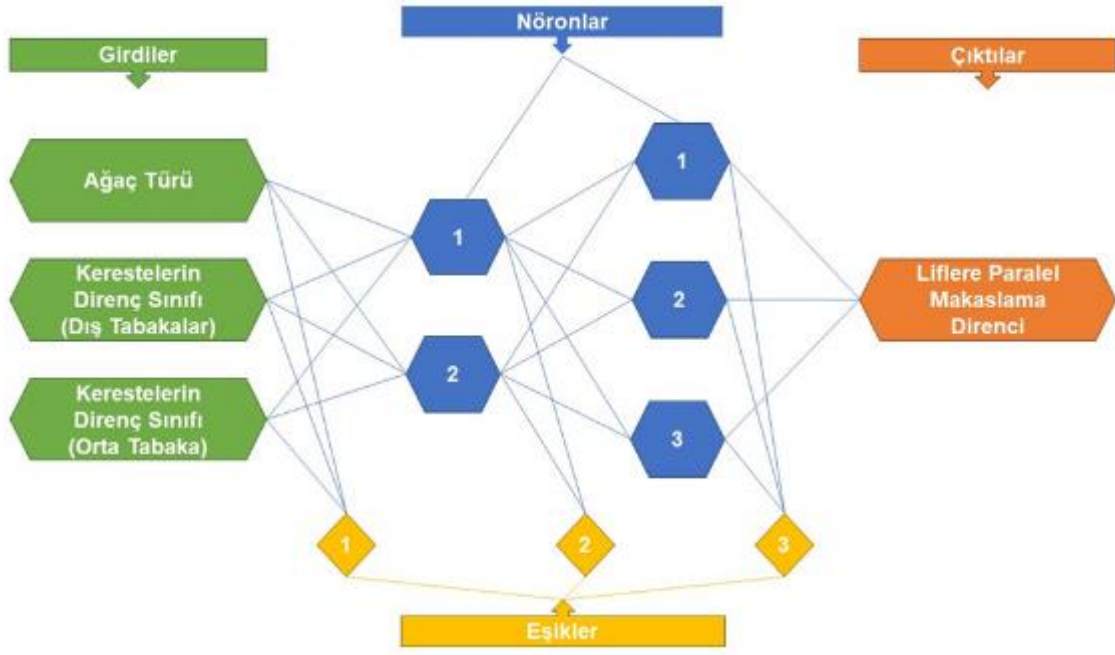
katmanda sırasıyla eğilme direncinde 4-2, elastikiyet modülünde 3-5, liflere paralel makaslama direncinde 2-3 ve rijitlikte 2-2 nöron kullanılmıştır.



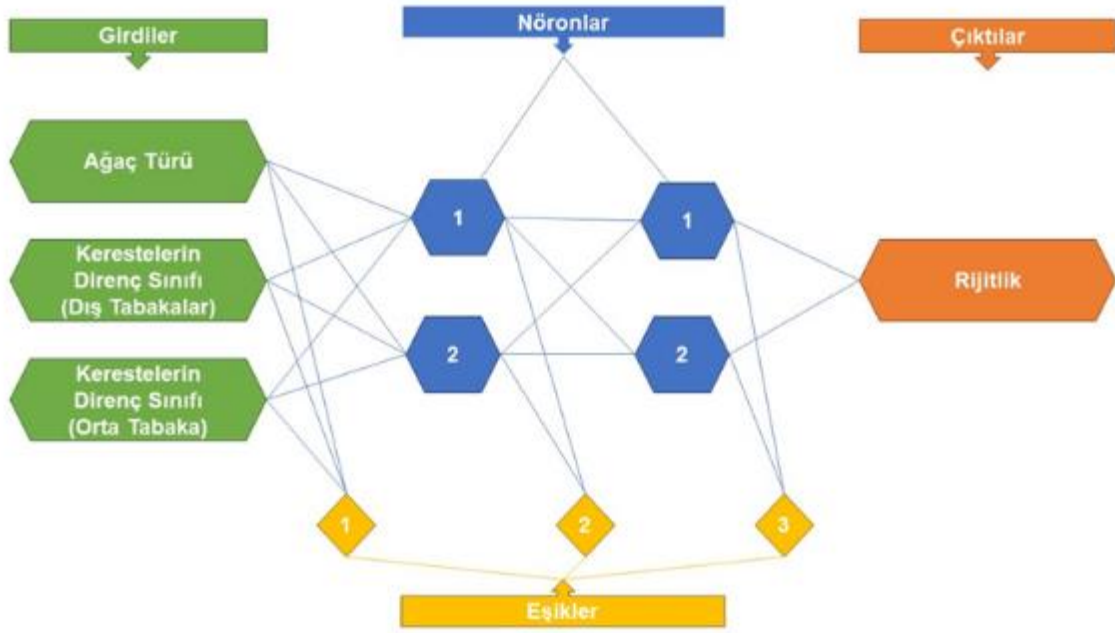
Şekil 28. Eğilme direnci tahmin modeli olarak seçilen YSA mimarisi



Şekil 29. Elastikiyet Modülü tahmin modeli olarak seçilen YSA mimarisi



Şekil 30. Liflere paralel makaslama direnci tahmin modeli olarak seçilen YSA mimarisi



Şekil 31. Rijitlik tahmin modeli olarak seçilen YSA mimarisi

Problemlerin çözümünde, ileri beslemeli ve geri yayımlı (Feed Forward and Back Propagation) çok katmanlı (Multilayer) YSA tercih edilmiştir. Bu çalışmada, aktivasyon (transfer) fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant sigmoid fonksiyonu (Hyperbolic Tangent Sigmoid Function - tansig) ve doğrusal transfer fonksiyonu (Linear Transfer Function -

purelin) kullanılmıştır. Öğrenme kuralı olarak momentumlu gradyan azaltım geri yayılım algoritması (Gradient Descent with Momentum Backpropagation Algorithm - traingdm), eğitim algoritması olarak ise Levenberg-Marquardt algoritması (trainlm) seçilmiştir. Performans ölçütü olarak, 4 numaralı eşitlikle hesaplanan ortalama karesel hata (Mean Square Error - MSE) kullanılmıştır.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - td_i)^2 \quad (4)$$

Hiperbolik tanjant sigmoid fonksiyonu kullanılarak oluşturulan modellerde, eğitim ve test verileri her bir değişkenin tahmin modellerine eşit katkı sağlaması amacıyla (-1,1) aralığında normalize edilerek ağı sunulmuştur. Sonuçların doğru yorumlanabilmesi için, bu veriler ters normalize edilerek orijinal değerlerine geri dönüştürülmüştür. Normalizasyon (ölçeklendirme) işlemleri, 5 numaralı eşitlik yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu eşitlikte, normalize edilmiş veriyi  $X_{norm}$ , değişkenin gerçek değerini  $X$ , veri grubunun minimum değerini  $X_{min}$  ve veri grubunun maksimum ise  $X_{max}$  değerini temsil etmektedir.

$$X_{norm} = 2 \times \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} - 1 \quad (5)$$

### 3. BULGULAR

#### 3.1. CLT Üretiminde Kullanılan Kerestelere Ait Bulgular

Çalışma kapsamında görünüş özelliklerine göre sınıflandırılan kerestelerin tahribatsız ve tahribatlı yöntemler ile testlerinin yapılarak TS EN 338 (2016) standardına göre direnç sınıflarının belirlenmesinde kullanılan veriler elde edilmiştir.

Tahribatsız testlerden elde edilen verilerden TS EN 338 (2016) standardında belirtilen C16, C22, C30 ve D18, D30, D40 direnç sınıfları oluşturulmuştur. Her bir direnç sınıfı grubu için, TS EN 384+A2 (2022) standardına göre tahribatlı yöntemler ile basınç direnci, makaslama direnci, eğilme direnci ve elastikiyet modülü testleri 6'şar tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk testleri için ise 20'şer örnek kullanılmıştır.

##### 3.1.1. Tahribatsız Rutubet Tayinine Ait Bulgular

Her bir kerestenin üç ayrı noktadan olacak şekilde (3240 adet) rutubet dereceleri, direnç tipi rutubet ölçer ile tahribatsız olarak tespit edilmiştir. Kerestelere ait rutubet değerleri ağaç ve görsel sınıflandırma türüne göre Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. CLT üretiminde kullanılan kerestelerin tahribatsız olarak tayin edilen ortalama rutubet değerleri

| Ağaç Türü | Görsel Kalite Sınıfı | Ortalama Rutubet Değeri (%) | Standart Sapma |
|-----------|----------------------|-----------------------------|----------------|
| Ladin     | I. Sınıf             | 15,32                       | 1,53           |
|           | II. Sınıf            | 15,79                       | 1,39           |
|           | III. Sınıf           | 15,44                       | 1,71           |
| Kızılağaç | I. Sınıf             | 12,79                       | 1,73           |
|           | II. Sınıf            | 13,29                       | 1,35           |

Tablo incelendiğinde, çalışma kapsamında temin edilen ladin kerestelerin tüm görsel kalite sınıflarının rutubet değerleri, kızılağaç kerestelerin görsel kalite sınıflarının değerlerinden daha yüksek bulunmuştur.

### 3.1.2. Tahribatsız Vida Tutma/Çekme ve Makaslama Modülü Direncine Ait Bulgular

Her bir kerestenin üç ayrı noktasından olacak şekilde (3240 adet) tahribatsız olarak vida tutma/çekme ve makaslama modülü direnci testleri yapılmıştır. Kerestelere ait tahribatsız yöntemler ile elde edilen vida tutma/çekme ve makaslama modülü direnci değerleri ağaç ve görsel sınıflandırma türüne göre Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. CLT üretiminde kullanılan kerestelerin tahribatsız olarak tayin edilen ortalama vida tutma/çekme ve makaslama modülü direnci değerleri

| Ağaç Türü | Görsel Kalite Sınıfı | Örnek Sayısı | Vida Tutma/Çekme Direnci (kN) |                | Makaslama Modülü Direnci (MPa) |                |
|-----------|----------------------|--------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
|           |                      |              | Ortalama                      | Standart Sapma | Ortalama                       | Standart Sapma |
| Ladin     | I. Sınıf             | 540          | 1,79                          | 0,25           | 611,12                         | 56,51          |
|           | II. Sınıf            | 540          | 1,62                          | 0,24           | 573,67                         | 53,23          |
|           | III. Sınıf           | 540          | 1,49                          | 0,33           | 543,55                         | 74,41          |
| Kızılağaç | I. Sınıf             | 810          | 2,57                          | 0,25           | 786,58                         | 56,85          |
|           | II. Sınıf            | 810          | 2,73                          | 0,37           | 820,98                         | 82,54          |

Çalışma kapsamında belirlenen ladin (C16, C22, C30) ve kızılağaç (D18, D30, D40) kerestelerinin direnç sınıfları için tahribatsız testlerden elde edilen vida tutma/çekme direnci ve makaslama modülü direnci verilerine çoğul varyans analizi yapılmış ve sonuçlar genel olarak %99 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Belirtilen testlerin istatistiksel etkileşim ve homojenlik gruplarına ait tabloları aşağıda verilmiştir.

Tablo 8. Tahribatsız yöntemle belirlenen vida tutma/çekme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 1,336           | 2                   | 0,668         | 11,772   | ***           |
|           | Hata             | 3,233           | 57                  | 0,057         |          |               |
|           | Toplam           | 168,855         | 60                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 0,885           | 2                   | 0,443         | 4,327    | *             |
|           | Hata             | 5,831           | 57                  | 0,102         |          |               |
|           | Toplam           | 438,926         | 60                  |               |          |               |

Tablo 9. Tahribatsız yöntemle belirlenen vida tutma/çekme direncinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları

| Varyans Kaynakları |                  | Vida Tutma Direnci (kN) | Homojenlik Grubu* |
|--------------------|------------------|-------------------------|-------------------|
| Ağaç Türü          | Direnç Sınıfları |                         |                   |
| Ladin              | C16              | 1,50                    | a                 |
|                    | C22              | 1,61                    | a                 |
|                    | C30              | 1,85                    | b                 |
| Kızılağaç          | D18              | 2,53                    | a                 |
|                    | D30              | 2,69                    | a                 |
|                    | D40              | 2,83                    | a                 |

\* Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablo 10. Tahribatsız yöntemle belirlenen makaslama modülü direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 82766,215       | 2                   | 41383,107     | 11,128   | ***           |
|           | Hata             | 211977,133      | 57                  | 3718,897      |          |               |
|           | Toplam           | 20717325,443    | 60                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 44413,309       | 2                   | 22206,654     | 4,327    | *             |
|           | Hata             | 292545,852      | 57                  | 5132,383      |          |               |
|           | Toplam           | 39819734,233    | 60                  |               |          |               |

Tablo 11. Tahribatsız yöntemle belirlenen makaslama modülü direncinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları

| Varyans Kaynakları |                  | Makaslama Modülü Direnci (MPa) | Homojenlik Grubu* |
|--------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|
| Ağaç Türü          | Direnç Sınıfları |                                |                   |
| Ladin              | C16              | 545,22                         | a                 |
|                    | C22              | 571,29                         | b                 |
|                    | C30              | 633,74                         | c                 |
| Kızılağaç          | D18              | 777,44                         | a                 |
|                    | D30              | 812,09                         | a                 |
|                    | D40              | 844,07                         | a                 |

\* Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablolar incelendiğinde, ladin kerestelerin C30 direnç sınıfı grubunun tahribatsız vida tutma/çekme direnci değerleri, diğer direnç sınıfı gruplarından istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerde ise direnç sınıfı grupları arasında istatistiksel olarak bir fark bulunamamıştır. Benzer şekilde, ladin kerestelerin C30 direnç sınıfı grubunun tahribatsız makaslama modülü direnci değerleri, diğer direnç sınıfı gruplarından istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerde ise direnç sınıfı grupları arasında istatistiksel olarak bir fark bulunamamıştır.

### 3.1.3. Tahribatsız Yoğunluk, Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Bulgular

Görsel olarak sınıflandırılmış kerestelerin tamamına akustik test cihazı (Sylvatest 4) kullanılarak tahribatsız testler yapılmış ve yoğunluk, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri elde edilmiştir. Kerestelere ait tahribatsız yöntemler ile elde edilen yoğunluk, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri ağaç ve görsel sınıflandırma türüne göre Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. CLT üretiminde kullanılan kerestelerin tahribatsız olarak tayin edilen ortalama yoğunluk, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri

| Ağaç Türü | Görsel Kalite Sınıfı | Örnek Sayısı | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) |                | Eğilme Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) |                | Elastikiyet Modülü (N/mm <sup>2</sup> ) |                |
|-----------|----------------------|--------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
|           |                      |              | Ortalama                      | Standart Sapma | Ortalama                            | Standart Sapma | Ortalama                                | Standart Sapma |
| Ladin     | I. Sınıf             | 540          | 0,309                         | 0,024          | 16,88                               | 5,22           | 8600,03                                 | 1531,10        |
|           | II. Sınıf            | 540          | 0,305                         | 0,022          | 16,12                               | 4,86           | 8538,79                                 | 2677,01        |
|           | III. Sınıf           | 540          | 0,297                         | 0,022          | 14,24                               | 5,18           | 7834,88                                 | 1610,74        |
| Kızılağaç | I. Sınıf             | 810          | 0,470                         | 0,009          | 22,71                               | 4,54           | 9900,08                                 | 1148,65        |
|           | II. Sınıf            | 810          | 0,464                         | 0,006          | 19,13                               | 4,15           | 9025,15                                 | 1035,80        |

Çalışma kapsamında belirlenen ladin (C16, C22, C30) ve kızılğaç (D18, D30, D40) kerestelerinin direnç sınıfları için tahribatsız testlerden elde edilen yoğunluk, eğilme direnci ve elastikiyet modülü verilerine çoğul varyans analizi yapılmış ve sonuçlar genel olarak %99 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Belirtilen testlerin istatistiksel etkileşim ve homojenlik gruplarına ait tabloları aşağıda verilmiştir.

Tablo 13. Tahribatsız yöntemle belirlenen yoğunluk verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 0,041           | 2                   | 0,020         | 39,684   | ***           |
|           | Hata             | 0,963           | 1617                | 0,001         |          |               |
|           | Toplam           | 173,960         | 1620                |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 0,008           | 1                   | 0,008         | 258,700  | ***           |
|           | Hata             | 0,025           | 1618                | 3,028E-005    |          |               |
|           | Toplam           | 177,713         | 1620                |               |          |               |

Tablo 14. Tahribatsız yöntemle belirlenen yoğunluk verilerinin SNK (Student Newman-Keuls) yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları

| Varyans Kaynakları |                  | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Homojenlik Grubu* |
|--------------------|------------------|-------------------------------|-------------------|
| Ağaç Türü          | Direnç Sınıfları |                               |                   |
| Ladin              | C16              | 0,299                         | a                 |
|                    | C22              | 0,308                         | b                 |
|                    | C30              | 0,306                         | b                 |
| Kızılağaç          | D18              | 0,466                         | a                 |
|                    | D30              | 0,476                         | b                 |
|                    | D40              | 0,478                         | b                 |

\* Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablo 15. Tahribatsız yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri  | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|-----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 13391,731       | 2                   | 6695,866      | 17647,687 | ***           |
|           | Hata             | 181,362         | 478                 | 0,379         |           |               |
|           | Toplam           | 233105,626      | 481                 |               |           |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 12479,341       | 2                   | 6239,670      | 9555,103  | ***           |
|           | Hata             | 87,505          | 134                 | 0,653         |           |               |
|           | Toplam           | 105982,943      | 137                 |               |           |               |

Tablo 16. Tahribatsız yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin SNK (Student Newman-Keuls) yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları

| Varyans Kaynakları |                  | Eğilme Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) | Homojenlik Grubu* |
|--------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Ağaç Türü          | Direnç Sınıfları |                                     |                   |
| Ladin              | C16              | 16,97                               | a                 |
|                    | C22              | 22,80                               | b                 |
|                    | C30              | 31,12                               | c                 |
| Kızılağaç          | D18              | 18,98                               | a                 |
|                    | D30              | 31,26                               | b                 |
|                    | D40              | 41,79                               | c                 |

\* Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablo 17. Tahribatsız yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri  | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|-----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 919560658,619   | 2                   | 459780329,310 | 7943,336  | ***           |
|           | Hata             | 43874954,163    | 758                 | 57882,525     |           |               |
|           | Toplam           | 86210702601,469 | 761                 |               |           |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 900192638,519   | 2                   | 450096319,259 | 16373,484 | ***           |
|           | Hata             | 12095311,182    | 440                 | 27489,344     |           |               |
|           | Toplam           | 53744700451,305 | 443                 |               |           |               |

Tablo 18. Tahribatsız yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları

| Varyans Kaynakları |                  | Elastikiyet Modülü (N/mm <sup>2</sup> ) | Homojenlik Grubu* |
|--------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| Ağaç Türü          | Direnç Sınıfları |                                         |                   |
| Ladin              | C16              | 8544,52                                 | a                 |
|                    | C22              | 10619,69                                | b                 |
|                    | C30              | 12299,42                                | c                 |
| Kızılağaç          | D18              | 9747,75                                 | a                 |
|                    | D30              | 11323,83                                | b                 |
|                    | D40              | 13207,32                                | c                 |

\* Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablolar incelendiğinde, ladin kerestelerin C22 ve C30 direnç sınıfı grubunun tahribatsız yoğunluk değerleri, C16 direnç sınıfı grubundan istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerde en yüksek yoğunluk değerleri istatistiksel olarak D30 ve D40 direnç sınıfı gruplarında bulunmuştur. Benzer şekilde ladin kerestelerin C30 direnç sınıfı grubunun tahribatsız eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri, diğer direnç sınıfı gruplarından istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerde en yüksek eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri istatistiksel olarak D40 direnç sınıfı grubunda bulunmuştur.

### 3.1.4. Tahribatlı Yoğunluk ve Basınç Direncine Ait Bulgular

Kereste gruplarına ait tahribatlı yöntemler ile elde edilen yoğunluk ve basınç direnci değerleri ağaç türüne göre Tablo 19’da verilmiştir.

Tablo 19. CLT üretiminde kullanılan kerestelerin tahribatlı olarak tayin edilen yoğunluk ve basınç direnci ortalama değerleri

| Ağaç Türü | TS EN 338’e göre Direnç Sınıfı | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) |                | Basınç Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) |                |
|-----------|--------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
|           |                                | Ortalama                      | Standart Sapma | Ortalama                            | Standart Sapma |
| Ladin     | C16                            | 0,425                         | 0,019          | 38,45                               | 0,97           |
|           | C22                            | 0,469                         | 0,016          | 44,95                               | 1,87           |
|           | C30                            | 0,452                         | 0,011          | 46,64                               | 1,55           |
| Kızılağaç | D18                            | 0,519                         | 0,013          | 44,17                               | 1,74           |
|           | D30                            | 0,571                         | 0,014          | 49,74                               | 1,38           |
|           | D40                            | 0,571                         | 0,016          | 53,04                               | 2,71           |

Tahribatlı testlerden elde edilen yoğunluk ve basınç direnci verilerine çoğul varyans analizi yapılmış ve sonuçlar genel olarak %99 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı

bulunmuştur. Belirtilen testlerin istatistiksel etkileşim ve homojenlik gruplarına ait tabloları aşağıda verilmiştir.

Tablo 20. Tahribatlı yöntemle belirlenen yoğunluk verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 0,024           | 2                   | 0,012         | 4,056    | *             |
|           | Hata             | 0,252           | 57                  | 0,003         |          |               |
|           | Toplam           | 20,157          | 60                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 0,057           | 2                   | 0,028         | 44,306   | ***           |
|           | Hata             | 0,056           | 57                  | 0,001         |          |               |
|           | Toplam           | 27,843          | 60                  |               |          |               |

Tablo 21. Tahribatlı yöntemle belirlenen yoğunluk SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları

| Varyans Kaynakları |                  | Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> ) | Homojenlik Grubu* |
|--------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|
| Ağaç Türü          | Direnç Sınıfları |                                |                   |
| Ladin              | C16              | 0,425                          | a                 |
|                    | C22              | 0,469                          | b                 |
|                    | C30              | 0,452                          | b                 |
| Kızılağaç          | D18              | 0,519                          | a                 |
|                    | D30              | 0,571                          | b                 |
|                    | D40              | 0,571                          | b                 |

\* Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablo 22. Tahribatlı yöntemle belirlenen basınç direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 347,062         | 2                   | 173,531       | 76,205   | ***           |
|           | Hata             | 56,929          | 25                  | 2,277         |          |               |
|           | Toplam           | 53289,303       | 28                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 385,671         | 2                   | 192,836       | 49,726   | ***           |
|           | Hata             | 104,706         | 27                  | 3,878         |          |               |
|           | Toplam           | 72147,466       | 30                  |               |          |               |

Tablo 23. Tahribatlı yöntemle belirlenen basınç direncinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları

| Varyans Kaynakları |                  | Basınç Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) | Homojenlik Grubu* |
|--------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Ağaç Türü          | Direnç Sınıfları |                                     |                   |
| Ladin              | C16              | 38,45                               | a                 |
|                    | C22              | 44,95                               | b                 |
|                    | C30              | 46,64                               | b                 |
| Kızılağaç          | D18              | 44,17                               | a                 |
|                    | D30              | 49,74                               | b                 |
|                    | D40              | 53,04                               | c                 |

\* Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablolar incelendiğinde, ladin kerestelerin C22 ve C30 direnç sınıfı gruplarının tahribatlı yoğunluk değerleri, C16 direnç sınıfı grubundan istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerde en yüksek yoğunluk değerleri istatistiksel olarak D30 ve D40 direnç sınıfı gruplarında bulunmuştur. Benzer şekilde ladin kerestelerin C22 ve C30 direnç sınıfı gruplarının tahribatlı basınç direnci değerleri, C16 direnç sınıfı grubundan istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerde en yüksek basınç direnci değerleri istatistiksel olarak D40 direnç sınıfı grubunda bulunmuştur.

### 3.1.5. Tahribatlı Makaslama Direnci, Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Bulgular

Kereste gruplarına ait tahribatlı yöntemler ile elde edilen makaslama direnci, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri ağaç türüne göre Tablo 24’te verilmiştir.

Tablo 24. CLT üretiminde kullanılan tahribatlı olarak tayin edilen ortalama makaslama direnci, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri

| Ağaç Türü | TS EN 338’e göre Direnç Sınıfı | Makaslama Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) |                | Eğilme Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) |                | Elastikiyet Modülü (N/mm <sup>2</sup> ) |                |
|-----------|--------------------------------|----------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
|           |                                | Ortalama                               | Standart Sapma | Ortalama                            | Standart Sapma | Ortalama                                | Standart Sapma |
| Ladin     | C <sub>16</sub>                | 1,78                                   | 0,22           | 15,40                               | 2,34           | 8286,52                                 | 343,94         |
|           | C <sub>22</sub>                | 2,28                                   | 0,35           | 20,99                               | 4,06           | 11039,03                                | 801,48         |
|           | C <sub>30</sub>                | 2,79                                   | 0,08           | 26,99                               | 0,99           | 12606,41                                | 790,62         |
| Kızılağaç | D <sub>18</sub>                | 2,78                                   | 0,23           | 26,85                               | 2,82           | 11135,36                                | 494,80         |
|           | D <sub>30</sub>                | 3,06                                   | 0,33           | 30,32                               | 4,07           | 13449,62                                | 962,54         |
|           | D <sub>40</sub>                | 3,07                                   | 0,23           | 30,38                               | 2,91           | 13767,38                                | 997,38         |

Tahribatlı testlerden elde edilen makaslama direnci, eğilme direnci ve elastikiyet modülü verilerine çoğul varyans analizi yapılmış ve sonuçlar genel olarak %99 güven

düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Belirtilen testlerin istatistiksel etkileşim ve homojenlik gruplarına ait tabloları aşağıda verilmiştir.

Tablo 25. Tahribatlı yöntemle belirlenen makaslama direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 3,081           | 2                   | 1,540         | 32,246   | ***           |
|           | Hata             | 0,717           | 15                  | 0,048         |          |               |
|           | Toplam           | 97,734          | 18                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 4,923           | 2                   | 2,462         | 57,538   | ***           |
|           | Hata             | 0,642           | 15                  | 0,043         |          |               |
|           | Toplam           | 132,766         | 18                  |               |          |               |

Tablo 26. Tahribatlı yöntemle belirlenen makaslama direncinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları

| Varyans Kaynakları |                  | Makaslama Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) | Homojenlik Grubu* |
|--------------------|------------------|----------------------------------------|-------------------|
| Ağaç Türü          | Direnç Sınıfları |                                        |                   |
| Ladin              | C16              | 1,78                                   | a                 |
|                    | C22              | 2,28                                   | b                 |
|                    | C30              | 2,79                                   | c                 |
| Kızılağaç          | D18              | 2,00                                   | a                 |
|                    | D30              | 2,69                                   | b                 |
|                    | D40              | 3,28                                   | c                 |

\* Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablo 27. Tahribatlı yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 403,387         | 2                   | 201,693       | 32,969   | ***           |
|           | Hata             | 91,766          | 15                  | 6,118         |          |               |
|           | Toplam           | 8532,583        | 18                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 693,737         | 2                   | 346,868       | 59,573   | ***           |
|           | Hata             | 87,338          | 15                  | 5,823         |          |               |
|           | Toplam           | 12524,878       | 18                  |               |          |               |

Tablo 28. Tahribatlı yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları

| Varyans Kaynakları |                  | Eğilme Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) | Homojenlik Grubu* |
|--------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Ağaç Türü          | Direnç Sınıfları |                                     |                   |
| Ladin              | C16              | 15,40                               | a                 |
|                    | C22              | 20,99                               | b                 |
|                    | C30              | 27,00                               | c                 |
| Kızılağaç          | D18              | 17,83                               | a                 |
|                    | D30              | 25,77                               | b                 |
|                    | D40              | 33,03                               | c                 |

\* Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablo 29. Tahribatlı yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 57388944,649    | 2                   | 28694472,324  | 77,651   | ***           |
|           | Hata             | 5542944,486     | 15                  | 369529,632    |          |               |
|           | Toplam           | 2102233305,296  | 18                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 34994587,005    | 2                   | 17497293,503  | 28,981   | ***           |
|           | Hata             | 9056397,051     | 15                  | 603759,803    |          |               |
|           | Toplam           | 2860443329,823  | 18                  |               |          |               |

Tablo 30. Tahribatlı yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları

| Varyans Kaynakları |                  | Elastikiyet Modülü (N/mm <sup>2</sup> ) | Homojenlik Grubu* |
|--------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| Ağaç Türü          | Direnç Sınıfları |                                         |                   |
| Ladin              | C16              | 8286,52                                 | a                 |
|                    | C22              | 11039,03                                | b                 |
|                    | C30              | 12606,42                                | c                 |
| Kızılağaç          | D18              | 10899,34                                | a                 |
|                    | D30              | 12326,48                                | b                 |
|                    | D40              | 14300,12                                | c                 |

\* Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablolar incelendiğinde, ladin kerestelerin C30 direnç sınıfı grubunun tahribatlı makaslama direnci değerleri, diğer direnç sınıfı gruplarından istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerde en yüksek makaslama değerleri istatistiksel olarak D40 direnç sınıfı grubunda bulunmuştur. Benzer şekilde ladin kerestelerin C30 direnç sınıfı grubunun tahribatlı eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri, diğer direnç sınıfı gruplarından istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerde en yüksek

eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri istatistiksel olarak D40 direnç sınıfı grubunda bulunmuştur.

### **3.2. CLT Panellere Ait Bulgular**

#### **3.2.1. CLT Panellerin Tahribatsız Rutubet ve Yoğunluk Testlerine Ait Bulgular**

Her bir panelde yirmi ayrı noktadan olacak şekilde tüm CLT panellerin rutubet dereceleri, direnç tipi rutubet ölçer ile tahribatsız olarak tespit edilmiştir. Her bir panelin yirmi ayrı noktasından olacak şekilde akustik test cihazı ile yoğunlukları belirlenmiştir. CLT panellere ait rutubet, yoğunluk değerleri ve SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları Tablo 31’de verilmiştir.

Tablo 31. CLT panellerin tahribatsız olarak tayin edilen ortalama rutubet, yoğunluk ve SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları değerleri

| Grup No | Ağaç Türü | Tabaka Kombinasyonu | Ortalama Rutubet Değerleri (%) | HG* | Std. Sapma | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | HG  | Std. Sapma |
|---------|-----------|---------------------|--------------------------------|-----|------------|-------------------------------|-----|------------|
| 1       | Ladin     | C16 - C16 - C16     | 14,02                          | a   | 0,293      | 0,462                         | a   | 0,010      |
| 2       |           | C22 - C22 - C22     | 14,00                          | a   | 0,228      | 0,458                         | a   | 0,025      |
| 3       |           | C30 - C30 - C30     | 13,98                          | a   | 0,183      | 0,455                         | a   | 0,009      |
| 4       |           | C16 - C22 - C16     | 14,08                          | a   | 0,488      | 0,450                         | a   | 0,015      |
| 5       |           | C22 - C16 - C22     | 14,00                          | a   | 0,374      | 0,470                         | ab  | 0,008      |
| 6       |           | C16 - C30 - C16     | 13,98                          | a   | 0,306      | 0,453                         | a   | 0,012      |
| 7       |           | C30 - C16 - C30     | 14,03                          | a   | 0,361      | 0,484                         | b   | 0,008      |
| 8       |           | C22 - C30 - C22     | 14,00                          | a   | 0,303      | 0,454                         | a   | 0,020      |
| 9       |           | C30 - C22 - C30     | 14,02                          | a   | 0,232      | 0,455                         | a   | 0,021      |
| 10      | Kızılağaç | D18 - D18 - D18     | 13,98                          | c   | 0,183      | 0,546                         | bc  | 0,014      |
| 11      |           | D30 - D30 - D30     | 13,00                          | b   | 0,369      | 0,521                         | ab  | 0,015      |
| 12      |           | D40 - D40 - D40     | 12,53                          | b   | 0,599      | 0,569                         | d   | 0,011      |
| 13      |           | D18 - D30 - D18     | 13,97                          | c   | 0,151      | 0,524                         | ab  | 0,021      |
| 14      |           | D30 - D18 - D30     | 13,00                          | b   | 0,200      | 0,528                         | abc | 0,010      |
| 15      |           | D18 - D40 - D18     | 14,00                          | c   | 0,253      | 0,538                         | bc  | 0,012      |
| 16      |           | D40 - D18 - D40     | 11,73                          | a   | 0,677      | 0,550                         | c   | 0,012      |
| 17      |           | D30 - D40 - D30     | 13,00                          | b   | 0,283      | 0,533                         | abc | 0,024      |
| 18      |           | D40 - D30 - D40     | 14,03                          | c   | 0,234      | 0,511                         | a   | 0,006      |
| 19      | Hibrit    | C16 - D18 - C16     | 15,02                          | c   | 0,387      | 0,521                         | ab  | 0,025      |
| 20      |           | C22 - D30 - C22     | 15,00                          | c   | 0,410      | 0,479                         | a   | 0,013      |
| 21      |           | C30 - D40 - C30     | 14,00                          | b   | 0,179      | 0,488                         | a   | 0,019      |
| 22      |           | D18 - C16 - D18     | 14,00                          | b   | 0,283      | 0,514                         | ab  | 0,020      |
| 23      |           | D30 - C22 - D30     | 13,00                          | a   | 0,190      | 0,502                         | ab  | 0,016      |
| 24      |           | D40 - C30 - D40     | 14,00                          | b   | 0,237      | 0,492                         | ab  | 0,003      |
| 25      |           | C16 - D30 - C16     | 15,00                          | c   | 0,369      | 0,540                         | b   | 0,065      |
| 26      |           | C16 - D40 - C16     | 15,00                          | c   | 0,268      | 0,485                         | a   | 0,024      |
| 27      |           | C22 - D40 - C22     | 14,00                          | b   | 0,200      | 0,531                         | ab  | 0,041      |
| 28      |           | D18 - C22 - D18     | 14,00                          | b   | 0,126      | 0,513                         | ab  | 0,009      |
| 29      |           | D18 - C30 - D18     | 14,00                          | b   | 0,200      | 0,508                         | ab  | 0,014      |
| 30      |           | D30 - C30 - D30     | 14,00                          | b   | 0,155      | 0,497                         | ab  | 0,012      |

\*HG: Homojenlik Grupları. Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç, Hibrit) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablo 32. Tahribatsız yöntemle belirlenen rutubet verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 0,046           | 8                   | 0,006         | 0,056    | Ö.D.          |
|           | Hata             | 4,595           | 45                  | 0,102         |          |               |
|           | Toplam           | 10608,530       | 54                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 31,373          | 8                   | 3,922         | 28,274   | ****          |
|           | Hata             | 6,242           | 45                  | 0,139         |          |               |
|           | Toplam           | 9517,990        | 54                  |               |          |               |
| Hibrit    | Direnç Sınıfları | 25,652          | 11                  | 2,332         | 32,935   | ****          |
|           | Hata             | 4,248           | 60                  | 0,071         |          |               |
|           | Toplam           | 14653,250       | 72                  |               |          |               |

Tablo 33. Tahribatsız yöntemle belirlenen yoğunluk verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 0,006           | 8                   | 0,001         | 3,044    | **            |
|           | Hata             | 0,011           | 45                  | 0,000         |          |               |
|           | Toplam           | 11,449          | 54                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 0,015           | 8                   | 0,002         | 8,633    | ***           |
|           | Hata             | 0,010           | 45                  | 0,000         |          |               |
|           | Toplam           | 15,515          |                     |               |          |               |
| Hibrit    | Direnç Sınıfları | 0,023           | 11                  | 0,002         | 2,908    | **            |
|           | Hata             | 0,044           | 60                  | 0,001         |          |               |
|           | Toplam           | 18,490          | 72                  |               |          |               |

Tablolar incelendiğinde, ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin direnç sınıflarının kombinasyonlarıyla oluşturulan gruplara ait tahribatsız rutubet değerlerinde istatistiksel olarak fark bulunamamıştır. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek rutubet değerleri istatistiksel olarak D18-D18-D18, D18-D30-D18, D18-D40-D18 ve D40-D30-D40 gruplarından elde edilmiştir. Hibrit CLT panellerde ise, C16-D18-C16, C22-D30-C22, C16-D30-C16 ve C16-D40-C16 kombinasyon grupları istatistiksel olarak en yüksek rutubet değerlerini vermiştir. Ayrıca, ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C30-C16-C30 grubunda tahribatsız yoğunluk değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek yoğunluk değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 grubundan elde edilmiştir. Hibrit CLT panellerde

ise, C16-D30-C16 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek yoğunluk değerini vermiştir.

### 3.2.2. CLT Panellerin Tahribatsız Vida Tutma/Çekme Direnci ve Makaslama Modülü Direncine Ait Bulgular

Her bir panelde yirmi ayrı noktadan olacak şekilde tüm CLT panellerin tahribatsız olarak vida tutma/çekme ve makaslama direnci testleri yapılmıştır. CLT panellere ait tahribatsız yöntemler ile elde edilen vida tutma/çekme direnci, makaslama direnci ve SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grup değerleri Tablo 34’te verilmiştir.

Tablo 34. CLT panellerde tahribatsız olarak tayin edilen ortalama vida tutma/çekme, makaslama direnci ve SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grup değerleri

| Grup No | Ağaç Türü | Tabaka Kombinasyonu | Vida Tutma/Çekme (kN) | HG* | Std. Sapma | Makaslama Modülü Direnci (MPa) | HG | Std. Sapma |
|---------|-----------|---------------------|-----------------------|-----|------------|--------------------------------|----|------------|
| 1       | Ladin     | C16 - C16 - C16     | 2,752                 | b   | 0,149      | 826,54                         | b  | 36,46      |
| 2       |           | C22 - C22 - C22     | 2,386                 | ab  | 0,748      | 744,38                         | ab | 167,61     |
| 3       |           | C30 - C30 - C30     | 2,157                 | a   | 0,142      | 693,27                         | a  | 31,77      |
| 4       |           | C16 - C22 - C16     | 2,200                 | a   | 0,349      | 702,84                         | a  | 78,11      |
| 5       |           | C22 - C16 - C22     | 2,301                 | ab  | 0,036      | 725,37                         | ab | 7,97       |
| 6       |           | C16 - C30 - C16     | 2,451                 | ab  | 0,198      | 758,96                         | ab | 44,37      |
| 7       |           | C30 - C16 - C30     | 2,539                 | ab  | 0,067      | 778,76                         | ab | 15,11      |
| 8       |           | C22 - C30 - C22     | 2,608                 | ab  | 0,135      | 794,16                         | ab | 33,15      |
| 9       |           | C30 - C22 - C30     | 2,544                 | ab  | 0,111      | 779,94                         | ab | 27,26      |
| 10      | Kızılağaç | D18 - D18 - D18     | 3,331                 | bc  | 0,147      | 956,25                         | bc | 35,97      |
| 11      |           | D30 - D30 - D30     | 3,144                 | b   | 0,226      | 914,26                         | b  | 55,55      |
| 12      |           | D40 - D40 - D40     | 3,576                 | c   | 0,101      | 1011,08                        | c  | 24,83      |
| 13      |           | D18 - D30 - D18     | 3,308                 | bc  | 0,276      | 951,06                         | bc | 67,80      |
| 14      |           | D30 - D18 - D30     | 3,299                 | bc  | 0,169      | 948,91                         | bc | 41,55      |
| 15      |           | D18 - D40 - D18     | 2,841                 | a   | 0,279      | 846,46                         | a  | 62,47      |
| 16      |           | D40 - D18 - D40     | 3,315                 | bc  | 0,150      | 952,63                         | bc | 33,53      |
| 17      |           | D30 - D40 - D30     | 3,349                 | bc  | 0,095      | 960,16                         | bc | 23,26      |
| 18      |           | D40 - D30 - D40     | 3,125                 | b   | 0,065      | 910,03                         | b  | 15,86      |
| 19      | Hibrit    | C16 - D18 - C16     | 3,043                 | ab  | 0,167      | 891,69                         | ab | 40,86      |
| 20      |           | C22 - D30 - C22     | 3,034                 | ab  | 0,041      | 889,71                         | ab | 10,05      |
| 21      |           | C30 - D40 - C30     | 3,167                 | b   | 0,115      | 919,49                         | b  | 28,32      |
| 22      |           | D18 - C16 - D18     | 3,209                 | b   | 0,413      | 928,84                         | b  | 101,42     |
| 23      |           | D30 - C22 - D30     | 2,876                 | ab  | 0,181      | 854,27                         | ab | 44,39      |
| 24      |           | D40 - C30 - D40     | 2,939                 | ab  | 0,029      | 868,42                         | ab | 7,14       |
| 25      |           | C16 - D30 - C16     | 2,672                 | a   | 0,367      | 808,58                         | a  | 90,17      |
| 26      |           | C16 - D40 - C16     | 2,965                 | ab  | 0,235      | 874,26                         | ab | 57,68      |
| 27      |           | C22 - D40 - C22     | 3,105                 | ab  | 0,272      | 905,48                         | ab | 66,78      |
| 28      |           | D18 - C22 - D18     | 3,241                 | b   | 0,075      | 935,95                         | b  | 18,36      |
| 29      |           | D18 - C30 - D18     | 2,782                 | ab  | 0,209      | 833,25                         | ab | 51,18      |
| 30      |           | D30 - C30 - D30     | 2,808                 | ab  | 0,104      | 839,05                         | ab | 25,53      |

\*HG: Homojenlik Grupları. Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç, Hibrit) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablo 35. Tahribatsız yöntemle belirlenen vida tutma/çekme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 1,836           | 8                   | 0,229         | 2,550    | *             |
|           | Hata             | 4,049           | 45                  | 0,090         |          |               |
|           | Toplam           | 326,647         | 54                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 1,957           | 8                   | 0,245         | 6,459    | ****          |
|           | Hata             | 1,704           | 45                  | 0,038         |          |               |
|           | Toplam           | 575,727         | 54                  |               |          |               |
| Hibrit    | Direnç Sınıfları | 2,108           | 11                  | 0,192         | 3,336    | ****          |
|           | Hata             | 3,446           | 60                  | 0,057         |          |               |
|           | Toplam           | 647,926         | 72                  |               |          |               |

Tablo 36. Tahribatsız yöntemle belirlenen makaslama direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 92207,398       | 8                   | 11525,925     | 2,553    | *             |
|           | Hata             | 203174,243      | 45                  | 4514,983      |          |               |
|           | Toplam           | 31160291,27     | 54                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 98321,366       | 8                   | 12290,171     | 6,454    | ****          |
|           | Hata             | 85690,283       | 45                  | 1904,229      |          |               |
|           | Toplam           | 47795142,79     | 54                  |               |          |               |
| Hibrit    | Direnç Sınıfları | 106428,783      | 11                  | 9675,44       | 3,374    | ****          |
|           | Hata             | 172035,291      | 60                  | 2867,255      |          |               |
|           | Toplam           | 55919076,66     | 72                  |               |          |               |

Tablolar incelendiğinde, ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C16-C16-C16 grubunda tahribatsız vida tutma/çekme direnci değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek vida tutma/çekme direnci değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 grubundan elde edilmiştir. Hibrit CLT panellerde ise, C30-D40-C30, D18-C16-D18 ve D18-C22-D18 kombinasyon grupları istatistiksel olarak en yüksek vida tutma/çekme direnci değerlerini vermiştir. Ayrıca, ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C16-C16-C16 grubunda tahribatsız makaslama direnci değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek makaslama direnci değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 grubundan elde edilmiştir. Hibrit CLT panellerde

ise, C30-D40-C30, D18-C16-D18 ve D18-C22-D18 kombinasyon grupları istatistiksel olarak en yüksek makaslama direnci değerlerini vermiştir.

### 3.2.3. CLT Panellerin Tahribatsız Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Bulgular

Üretilen CLT panellerin tamamına yirmi farklı noktadan akustik test cihazı (Sylvatest 4) kullanılarak tahribatsız testler yapılmış, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri elde edilmiştir. CLT panellere ait tahribatsız yöntemler ile elde edilen eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri ve SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grup değerleri Tablo 37’de verilmiştir.

Tablo 37. CLT panellerde tahribatsız olarak tayin edilen eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri

| Grup No | Ağaç Türü | Tabaka Kombinasyonu | Eğilme Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) | HG* | Std. Sapma | Elastikiyet Modülü (N/mm <sup>2</sup> ) | HG  | Std. Sapma |
|---------|-----------|---------------------|-------------------------------------|-----|------------|-----------------------------------------|-----|------------|
| 1       | Ladin     | C16 - C16 - C16     | 8,00                                | a   | 0,00       | 7033,85                                 | a   | 225,59     |
| 2       |           | C22 - C22 - C22     | 13,35                               | bc  | 2,72       | 8516,84                                 | b   | 1022,12    |
| 3       |           | C30 - C30 - C30     | 24,07                               | f   | 1,71       | 9861,91                                 | c   | 172,01     |
| 4       |           | C16 - C22 - C16     | 8,00                                | a   | 0,00       | 6989,65                                 | a   | 311,25     |
| 5       |           | C22 - C16 - C22     | 11,10                               | ab  | 1,72       | 7709,84                                 | a   | 341,25     |
| 6       |           | C16 - C30 - C16     | 8,00                                | a   | 0,00       | 7672,31                                 | a   | 127,81     |
| 7       |           | C30 - C16 - C30     | 16,99                               | de  | 2,22       | 10739,71                                | d   | 141,02     |
| 8       |           | C22 - C30 - C22     | 14,43                               | cd  | 3,88       | 8676,01                                 | b   | 319,54     |
| 9       |           | C30 - C22 - C30     | 18,88                               | e   | 4,15       | 9472,06                                 | c   | 676,54     |
| 10      | Kızılağaç | D18 - D18 - D18     | 13,28                               | a   | 2,88       | 8364,96                                 | b   | 410,73     |
| 11      |           | D30 - D30 - D30     | 20,48                               | b   | 2,37       | 9279,82                                 | c   | 891,76     |
| 12      |           | D40 - D40 - D40     | 23,41                               | b   | 4,53       | 10797,20                                | d   | 615,78     |
| 13      |           | D18 - D30 - D18     | 11,13                               | a   | 2,95       | 7367,00                                 | a   | 500,19     |
| 14      |           | D30 - D18 - D30     | 20,85                               | b   | 1,31       | 9547,54                                 | c   | 447,81     |
| 15      |           | D18 - D40 - D18     | 13,74                               | a   | 1,51       | 9709,15                                 | c   | 520,46     |
| 16      |           | D40 - D18 - D40     | 23,65                               | b   | 3,59       | 10501,22                                | d   | 436,80     |
| 17      |           | D30 - D40 - D30     | 19,28                               | b   | 3,89       | 9234,81                                 | c   | 232,50     |
| 18      |           | D40 - D30 - D40     | 22,37                               | b   | 3,72       | 9588,19                                 | c   | 93,81      |
| 19      | Hibrit    | C16 - D18 - C16     | 15,76                               | cd  | 3,01       | 8732,93                                 | abc | 455,42     |
| 20      |           | C22 - D30 - C22     | 10,13                               | ab  | 2,50       | 8953,51                                 | bc  | 1417,94    |
| 21      |           | C30 - D40 - C30     | 10,47                               | ab  | 2,55       | 10204,91                                | de  | 643,01     |
| 22      |           | D18 - C16 - D18     | 12,74                               | abc | 3,55       | 7580,76                                 | a   | 149,72     |
| 23      |           | D30 - C22 - D30     | 16,03                               | cd  | 2,02       | 8464,97                                 | abc | 321,54     |
| 24      |           | D40 - C30 - D40     | 21,30                               | e   | 2,47       | 9421,64                                 | cd  | 77,27      |
| 25      |           | C16 - D30 - C16     | 10,35                               | ab  | 2,07       | 8861,38                                 | bc  | 423,39     |
| 26      |           | C16 - D40 - C16     | 8,45                                | ab  | 0,79       | 9251,20                                 | cd  | 451,19     |
| 27      |           | C22 - D40 - C22     | 10,58                               | ab  | 1,82       | 10435,73                                | e   | 1021,84    |
| 28      |           | D18 - C22 - D18     | 14,31                               | bcd | 4,54       | 7856,74                                 | ab  | 680,11     |
| 29      |           | D18 - C30 - D18     | 9,75                                | ab  | 1,67       | 7779,99                                 | ab  | 385,62     |
| 30      |           | D30 - C30 - D30     | 17,98                               | d   | 2,87       | 8356,44                                 | abc | 480,77     |

\*HG: Homojenlik Grupları. Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç, Hibrit) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablo 38. Tahribatsız yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 1499,314        | 8                   | 187,414       | 33,388   | ***           |
|           | Hata             | 252,598         | 45                  | 5,613         |          |               |
|           | Toplam           | 11806,503       | 54                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 1077,401        | 8                   | 134,675       | 13,620   | ***           |
|           | Hata             | 444,957         | 45                  | 9,888         |          |               |
|           | Toplam           | 20380,195       | 54                  |               |          |               |
| Hibrit    | Direnç Sınıfları | 1024,781        | 11                  | 93,162        | 13,239   | ***           |
|           | Hata             | 422,218         | 60                  | 7,037         |          |               |
|           | Toplam           | 13904,784       | 72                  |               |          |               |

Tablo 39. Tahribatsız yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 81505054,3      | 8                   | 10188131,79   | 44,582   | ***           |
|           | Hata             | 10283564,76     | 45                  | 228523,661    |          |               |
|           | Toplam           | 4010870634      | 54                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 51352909,3      | 8                   | 6419113,657   | 21,479   | ***           |
|           | Hata             | 13448701,89     | 45                  | 298860,042    |          |               |
|           | Toplam           | 4812571435      | 54                  |               |          |               |
| Hibrit    | Direnç Sınıfları | 53936312,5      | 11                  | 4903301,139   | 9,743    | ***           |
|           | Hata             | 30195463,97     | 60                  | 503257,733    |          |               |
|           | Toplam           | 5691558127      | 72                  |               |          |               |

Tablolar incelendiğinde, ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C30-C30-C30 grubunda tahribatsız eğilme direnci değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek eğilme direnci değerleri istatistiksel olarak D30-D30-D30, D40-D40-D40, D30-D18-D30, D40-D18-D40, D30-D40-D30 ve D40-D30-D40 gruplarından elde edilmiştir. Hibrit CLT panellerde ise, D30-C30-D30 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek eğilme direnci değerini vermiştir. Ayrıca, ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C30-C16-C30 grubunda tahribatsız elastikiyet modülü değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek elastikiyet modülü değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 ve D40-D18-D40

gruplarından elde edilmiştir. Hibrit CLT panellerde ise, C22-D40-C22 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek elastikiyet modülü değerlerini vermiştir.

#### **3.2.4. CLT Panellerin Tahribatlı Yoğunluk ve Liflere Paralel Makaslama Direncine Ait Bulgular**

Tabaka kombinasyonuna göre üretilen 30 adet CLT panel grupları için, TS EN 408+A1 (2014) standardına göre tahribatlı yöntemler ile liflere paralel makaslama direnci, testleri 6'şar tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk testleri için ise 20'şer örnek kullanılmıştır. CLT panellere ait yoğunluk değerleri ve liflere paralel makaslama direncine ait SNK yöntemiyle belirlenen homojenlik grupları Tablo 40'ta verilmiştir.



Tablo 40. CLT panellerde tahribatlı olarak tayin edilen yoğunluk ve liflere paralel makaslama direnci ortalama değerlerine ait homojenlik grupları

| Grup No | Ağaç Türü | Tabaka Kombinasyonu | Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> ) | HG* | Std. Sapma | Liflere Paralel Makaslama Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) | HG  | Std. Sapma |
|---------|-----------|---------------------|--------------------------------|-----|------------|--------------------------------------------------------|-----|------------|
| 1       | Ladin     | C16 - C16 - C16     | 0,461                          | a   | 0,017      | 2,42                                                   | b   | 0,111      |
| 2       |           | C22 - C22 - C22     | 0,455                          | a   | 0,051      | 2,47                                                   | b   | 0,291      |
| 3       |           | C30 - C30 - C30     | 0,456                          | a   | 0,008      | 2,51                                                   | b   | 0,404      |
| 4       |           | C16 - C22 - C16     | 0,449                          | a   | 0,017      | 2,51                                                   | b   | 0,316      |
| 5       |           | C22 - C16 - C22     | 0,473                          | a   | 0,005      | 1,90                                                   | a   | 0,358      |
| 6       |           | C16 - C30 - C16     | 0,455                          | a   | 0,011      | 2,34                                                   | b   | 0,218      |
| 7       |           | C30 - C16 - C30     | 0,485                          | a   | 0,005      | 2,09                                                   | ab  | 0,397      |
| 8       |           | C22 - C30 - C22     | 0,457                          | a   | 0,019      | 2,43                                                   | b   | 0,175      |
| 9       |           | C30 - C22 - C30     | 0,456                          | a   | 0,013      | 2,45                                                   | b   | 0,235      |
| 10      | Kızılağaç | D18 - D18 - D18     | 0,547                          | c   | 0,009      | 2,23                                                   | ab  | 0,381      |
| 11      |           | D30 - D30 - D30     | 0,522                          | ab  | 0,012      | 2,87                                                   | bc  | 0,497      |
| 12      |           | D40 - D40 - D40     | 0,569                          | c   | 0,006      | 2,18                                                   | ab  | 0,187      |
| 13      |           | D18 - D30 - D18     | 0,523                          | ab  | 0,019      | 2,56                                                   | bc  | 0,442      |
| 14      |           | D30 - D18 - D30     | 0,527                          | abc | 0,009      | 2,85                                                   | bc  | 0,379      |
| 15      |           | D18 - D40 - D18     | 0,535                          | bc  | 0,007      | 1,81                                                   | a   | 0,348      |
| 16      |           | D40 - D18 - D40     | 0,548                          | c   | 0,014      | 2,43                                                   | abc | 0,255      |
| 17      |           | D30 - D40 - D30     | 0,530                          | abc | 0,023      | 2,69                                                   | bc  | 0,430      |
| 18      |           | D40 - D30 - D40     | 0,510                          | a   | 0,005      | 3,01                                                   | c   | 0,362      |
| 19      | Hibrit    | C16 - D18 - C16     | 0,520                          | ab  | 0,023      | 2,47                                                   | c   | 0,439      |
| 20      |           | C22 - D30 - C22     | 0,479                          | a   | 0,010      | 1,69                                                   | ab  | 0,290      |
| 21      |           | C30 - D40 - C30     | 0,489                          | a   | 0,017      | 3,37                                                   | d   | 0,269      |
| 22      |           | D18 - C16 - D18     | 0,511                          | ab  | 0,023      | 3,21                                                   | bc  | 0,413      |
| 23      |           | D30 - C22 - D30     | 0,503                          | ab  | 0,014      | 2,88                                                   | bc  | 0,181      |
| 24      |           | D40 - C30 - D40     | 0,493                          | a   | 0,001      | 1,67                                                   | ab  | 0,240      |
| 25      |           | C16 - D30 - C16     | 0,556                          | b   | 0,085      | 2,25                                                   | bc  | 0,450      |
| 26      |           | C16 - D40 - C16     | 0,482                          | a   | 0,019      | 1,73                                                   | ab  | 0,261      |
| 27      |           | C22 - D40 - C22     | 0,528                          | ab  | 0,037      | 2,39                                                   | c   | 0,462      |
| 28      |           | D18 - C22 - D18     | 0,516                          | ab  | 0,004      | 2,10                                                   | abc | 0,276      |
| 29      |           | D18 - C30 - D18     | 0,504                          | ab  | 0,014      | 1,55                                                   | a   | 0,208      |
| 30      |           | D30 - C30 - D30     | 0,496                          | ab  | 0,016      | 2,81                                                   | c   | 0,104      |

\*HG: Homojenlik Grupları. Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç, Hibrit) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablo 41. Tahribatlı yöntemle belirlenen yoğunluk verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 0,006           | 8                   | 0,001         | 1,666    | Ö.D.          |
|           | Hata             | 0,021           | 45                  | 0,000         |          |               |
|           | Toplam           | 11,494          | 54                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 0,015           | 8                   | 0,002         | 9,556    | ****          |
|           | Hata             | 0,009           | 45                  | 0,000         |          |               |
|           | Toplam           | 15,452          | 54                  |               |          |               |
| Hibrit    | Direnç Sınıfları | 0,031           | 11                  | 0,003         | 2,531    | *             |
|           | Hata             | 0,067           | 60                  | 0,001         |          |               |
|           | Toplam           | 18,556          | 72                  |               |          |               |

Tablo 42. Tahribatlı yöntemle belirlenen liflere paralel makaslama direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 2,148           | 8                   | 0,268         | 3,016    | **            |
|           | Hata             | 4,005           | 45                  | 0,089         |          |               |
|           | Toplam           | 303,570         | 54                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 7,227           | 8                   | 0,903         | 5,468    | ***           |
|           | Hata             | 7,435           | 45                  | 0,165         |          |               |
|           | Toplam           | 356,023         | 54                  |               |          |               |
| Hibrit    | Direnç Sınıfları | 16,213          | 11                  | 1,474         | 11,701   | ***           |
|           | Hata             | 7,558           | 60                  | 0,126         |          |               |
|           | Toplam           | 363,073         | 72                  |               |          |               |

Tablolar incelendiğinde, ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin direnç sınıflarının kombinasyonlarıyla oluşturulan gruplara ait tahribatlı yoğunluk değerlerinde istatistiksel olarak fark bulunamamıştır. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek yoğunluk değerleri istatistiksel olarak D18-D18-D18, D40-D40-D40 ve D40-D18-D40 gruplarından elde edilmiştir. Hibrit CLT panellerde ise, C16-D30-C16 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek yoğunluk değerini vermiştir. Ayrıca, ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C22-C16-C22 grubu dışındaki diğer tüm gruplarında tahribatlı liflere paralel makaslama direnci değerleri, istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek liflere paralel makaslama direnci değerleri istatistiksel olarak D40-D30-D40 grubundan elde edilmiştir. Hibrit CLT panellerde

ise, C16-D18-C16, C22-D40-C22 ve D30-C30-D30 kombinasyon grupları istatistiksel olarak en yüksek liflere paralel makaslama direnci değerlerini vermiştir.

### 3.2.5. CLT Panellerin Tahribatlı Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Bulgular

Tabaka kombinasyonuna göre üretilen 30 adet CLT panel grupları için, TS EN 408+A1 (2014) standardına göre tahribatlı yöntemler ile eğilme direnci ve elastikiyet modülü testleri 6'şar tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. CLT panel gruplarına ait tahribatlı yöntemler ile elde edilen, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri Tablo 43'te verilmiştir.

Tablo 43. CLT panellerde tahribatlı olarak tayin edilen eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerine ait homojenlik grupları

| Grup No | Ağaç Türü | Tabaka Kombinasyonu | Eğilme Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) | HG* | Std. Sapma | Elastikiyet Modülü (N/mm <sup>2</sup> ) | HG  | Std. Sapma |
|---------|-----------|---------------------|-------------------------------------|-----|------------|-----------------------------------------|-----|------------|
| 1       | Ladin     | C16 - C16 - C16     | 16,96                               | b   | 0,88       | 10109,14                                | b   | 557,85     |
| 2       |           | C22 - C22 - C22     | 20,35                               | c   | 1,17       | 12405,00                                | de  | 492,72     |
| 3       |           | C30 - C30 - C30     | 19,60                               | bc  | 0,75       | 13291,38                                | e   | 783,59     |
| 4       |           | C16 - C22 - C16     | 13,77                               | a   | 1,71       | 11094,82                                | bc  | 1016,98    |
| 5       |           | C22 - C16 - C22     | 13,55                               | a   | 2,20       | 10667,49                                | bc  | 872,83     |
| 6       |           | C16 - C30 - C16     | 16,69                               | b   | 2,83       | 8904,05                                 | a   | 444,99     |
| 7       |           | C30 - C16 - C30     | 18,73                               | bc  | 1,59       | 12805,93                                | de  | 691,86     |
| 8       |           | C22 - C30 - C22     | 17,19                               | bc  | 1,04       | 11757,49                                | cd  | 11757,49   |
| 9       |           | C30 - C22 - C30     | 19,24                               | bc  | 3,51       | 13087,41                                | e   | 1312,09    |
| 10      | Kızılağaç | D18 - D18 - D18     | 10,18                               | a   | 0,45       | 9846,02                                 | bc  | 811,80     |
| 11      |           | D30 - D30 - D30     | 11,56                               | ab  | 0,73       | 12252,38                                | cd  | 658,87     |
| 12      |           | D40 - D40 - D40     | 16,45                               | c   | 1,89       | 13340,39                                | d   | 2288,67    |
| 13      |           | D18 - D30 - D18     | 14,89                               | bc  | 2,51       | 10651,16                                | bc  | 1480,69    |
| 14      |           | D30 - D18 - D30     | 9,79                                | a   | 3,16       | 6712,05                                 | a   | 1330,42    |
| 15      |           | D18 - D40 - D18     | 14,92                               | bc  | 2,61       | 10236,47                                | bc  | 806,64     |
| 16      |           | D40 - D18 - D40     | 11,90                               | ab  | 1,65       | 10531,10                                | bc  | 791,20     |
| 17      |           | D30 - D40 - D30     | 12,00                               | ab  | 2,59       | 9091,04                                 | b   | 772,23     |
| 18      |           | D40 - D30 - D40     | 9,77                                | a   | 2,10       | 10138,68                                | bc  | 1883,10    |
| 19      | Hibrit    | C16 - D18 - C16     | 11,77                               | abc | 0,39       | 11312,98                                | bcd | 982,29     |
| 20      |           | C22 - D30 - C22     | 15,47                               | cd  | 3,40       | 12998,63                                | d   | 171,06     |
| 21      |           | C30 - D40 - C30     | 16,65                               | d   | 0,80       | 14867,10                                | e   | 974,82     |
| 22      |           | D18 - C16 - D18     | 11,44                               | ab  | 0,60       | 9461,30                                 | abc | 758,22     |
| 23      |           | D30 - C22 - D30     | 9,83                                | a   | 2,57       | 8983,15                                 | ab  | 1534,17    |
| 24      |           | D40 - C30 - D40     | 10,88                               | ab  | 2,54       | 10221,66                                | abc | 1548,06    |
| 25      |           | C16 - D30 - C16     | 10,77                               | ab  | 0,37       | 11539,11                                | cd  | 1697,26    |
| 26      |           | C16 - D40 - C16     | 12,98                               | abc | 1,56       | 10661,48                                | abc | 581,72     |
| 27      |           | C22 - D40 - C22     | 10,03                               | a   | 2,44       | 11351,45                                | bcd | 2571,56    |
| 28      |           | D18 - C22 - D18     | 13,24                               | abc | 2,42       | 9097,35                                 | abc | 649,87     |
| 29      |           | D18 - C30 - D18     | 14,25                               | bcd | 2,72       | 8606,04                                 | a   | 133,50     |
| 30      |           | D30 - C30 - D30     | 12,51                               | abc | 1,06       | 10307,80                                | abc | 1023,39    |

\*HG: Homojenlik Grupları. Grup içerisindeki (Ladin, Kızılağaç, Hibrit) aynı harfler istatistiksel olarak bir fark olmadığını ifade etmektedir.

Tablo 44. Tahribatlı yöntemle belirlenen eğilme direnci verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 248,048         | 8                   | 35,506        | 9,185    | ***           |
|           | Hata             | 173,960         | 45                  | 3,866         |          |               |
|           | Toplam           | 16696,225       | 54                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 292,177         | 8                   | 36,522        | 6,920    | ***           |
|           | Hata             | 237,505         | 45                  | 5,278         |          |               |
|           | Toplam           | 8811,656        | 54                  |               |          |               |
| Hibrit    | Direnç Sınıfları | 302,526         | 11                  | 27,502        | 5,650    | ***           |
|           | Hata             | 292,043         | 60                  | 4,867         |          |               |
|           | Toplam           | 11815,837       | 72                  |               |          |               |

Tablo 45. Tahribatlı yöntemle belirlenen elastikiyet modülü verilerinin çoğul varyans analizine ait istatistiksel etkileşim

| Ağaç Türü | Kaynak           | Kareler Toplamı | Serbestlik Derecesi | Ortalama Kare | F Değeri | Önem Derecesi |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|----------|---------------|
| Ladin     | Direnç Sınıfları | 106843961       | 8                   | 13355495,12   | 18,022   | ***           |
|           | Hata             | 33347789,48     | 45                  | 741061,988    |          |               |
|           | Toplam           | 7367885168      | 54                  |               |          |               |
| Kızılağaç | Direnç Sınıfları | 166815142       | 8                   | 20851892,80   | 10,090   | ***           |
|           | Hata             | 92999349,99     | 45                  | 2066652,222   |          |               |
|           | Toplam           | 6000952690      | 54                  |               |          |               |
| Hibrit    | Direnç Sınıfları | 215323044       | 11                  | 19574822,22   | 10,530   | ***           |
|           | Hata             | 111533700,7     | 60                  | 1858895,012   |          |               |
|           | Toplam           | 8700078016      | 72                  |               |          |               |

Tablolar incelendiğinde, ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C22-C22-C22 grubunda tahribatlı eğilme direnci değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek eğilme direnci değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 grubundan elde edilmiştir. Hibrit CLT panellerde ise, C30-D40-C30 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek eğilme direnci değerini vermiştir. Ayrıca, ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C30-C30-C30 ve C30-C22-C30 gruplarında tahribatlı elastikiyet modülü değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek elastikiyet modülü değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 grubundan elde edilmiştir. Hibrit CLT panellerde ise, C30-D40-C30 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek elastikiyet modülü değerlerini vermiştir.

### 3.3. CLT Duvarlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylere Ait Bulgular

ASTM E 72 (2014) standardına göre yapılan yanal yük deneyinde, CLT duvar sırasıyla 354 712, 1071kg'lık kuvvetlerle itilmiş ve yük boşaltılmıştır. Ayrıca belirtilen her bir kuvvette elde edilen yer değiştirmeler de kaydedilmiştir. Belirtilen bu kuvvetlerden sonra ise son aşama olarak CLT duvar kırılıncaya kadar yükleme devam ettirilmiştir. Uygulanan test prosedürü sonunda her bir duvar için maksimum yük miktarı ve maksimum yükteki yer değiştirme miktarı elde edilmiştir. Ayrıca her bir duvar için belirlenen düğüm noktalarındaki LVDT'ler yardımıyla farklı yer değiştirmelerde kaydedilmiştir. CLT duvarların yanal yük altındaki maksimum yük değerleri ve düğüm noktalarına göre yer değiştirme miktarları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 46. Perde duvar analizlerinde Grup 1'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 1</b>         | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |           |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|-----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i>  | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,00400                     | -0,04907 | 0,0736114 | 0,067473 | 0,190151 |
| 712                       | 2,50300                     | -0,14109 | 0,380325  | 0,269892 | 0,496847 |
| 1071                      | 3,49800                     | -0,19630 | 0,619562  | 0,417106 | 0,766739 |
| Maksimum Yük:<br>7362,08  | 99,69700                    | 2,62547  | 35,9898   | 13,6909  | 7,95568  |

Tablo 47. Perde duvar analizlerinde Grup 2'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 2</b>         | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,00200                     | -0,055   | 0,024537 | 0,012268 | 0,018402 |
| 712                       | 3,50000                     | -0,104   | 0,030671 | 0,153348 | 0,325097 |
| 1071                      | 5,44700                     | -0,147   | 0,153357 | 0,325097 | 0,423240 |
| Maksimum Yük:<br>8009,76  | 90,01500                    | 1,000    | 37,78720 | 20,71420 | 28,89070 |

Tablo 48. Perde duvar analizlerinde Grup 3'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 3</b>         | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 2,00100                     | -0,69931 | 0,15336  | 0,04294  | 0,03067  |
| 712                       | 4,99800                     | -1,61332 | 0,86493  | 0,33737  | 0,31283  |
| 1071                      | 5,50000                     | -1,71146 | 0,96922  | 0,49071  | 0,65633  |
| Maksimum Yük:<br>6674,18  | 99,94600                    | -1,21459 | 43,49200 | 29,12990 | 55,26650 |

Tablo 49. Perde duvar analizlerinde Grup 4'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 4</b>         | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 2,0030                      | -0,27604 | 0,09815  | 0,00000  | 0,42324  |
| 712                       | 2,9960                      | -0,46621 | 0,26991  | 0,01227  | 0,94462  |
| 1071                      | 3,9960                      | -0,60729 | 0,49688  | 0,00000  | 1,39240  |
| Maksimum Yük:<br>8100,93  | 95,9640                     | 0,88947  | 29,81260 | 18,70230 | 28,49200 |

Tablo 50. Perde duvar analizlerinde Grup 5'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 5</b>         | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |           |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i>  |
| 354                       | 1,997                       | -0,07361 | 1,10417  | -0,00613 | 0,00613   |
| 712                       | 5,498                       | -0,12882 | 2,69295  | 0,05521  | 0,00613   |
| 1071                      | 8,003                       | -0,14722 | 3,83393  | 0,93235  | 3,18963   |
| Maksimum Yük:<br>6039,58  | 99,855                      | 2,85244  | 50,07410 | 23,18620 | -31,55900 |

Tablo 51. Perde duvar analizlerinde Grup 6'ya ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 6</b>         | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,988                       | -0,20857 | 0,78519  | 0,00000  | 0,39257  |
| 712                       | 4,991                       | -0,68704 | 1,68079  | 0,098143 | 0,41097  |
| 1071                      | 7,485                       | -0,88948 | 2,50279  | 0,061339 | 0,64406  |
| Maksimum Yük:<br>5458,96  | 66,499                      | -2,72362 | 27,80670 | 0,03067  | 10,53190 |

Tablo 52. Perde duvar analizlerinde Grup 7'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 7</b>         | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,003                       | -0,07361 | 0,12269  | 0,06134  | 0,07361  |
| 712                       | 2,000                       | -0,11042 | 0,26377  | 0,18402  | 0,19629  |
| 1071                      | 2,500                       | -0,14109 | 0,32512  | 0,30670  | 0,44778  |
| Maksimum Yük:<br>8254,58  | 92,267                      | 1,07963  | 32,86750 | 4,56363  | -0,66246 |

Tablo 53. Perde duvar analizlerinde Grup 8'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 8</b>         | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,004                       | -0,16563 | 0,01840  | 0,01840  | 0,01227  |
| 712                       | 3,001                       | -0,42327 | 0,07975  | 0,19629  | 0,16562  |
| 1071                      | 4,001                       | -0,50301 | 0,24537  | 0,39257  | 0,71767  |
| Maksimum Yük:<br>9121,28  | 69,715                      | -1,50903 | 30,29110 | 18,61030 | 34,42350 |

Tablo 54. Perde duvar analizlerinde Grup 9'a ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 9</b>         | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,004                       | 0,01227  | -0,00613 | -0,01227 | 0,00613  |
| 712                       | 2,504                       | -0,28218 | -0,01227 | 0,00613  | -0,01227 |
| 1071                      | 4,499                       | -0,76065 | -0,02454 | -0,00613 | 0,01840  |
| Maksimum Yük:<br>9425,67  | 104,960                     | -5,36136 | 26,08910 | 7,50177  | 5,08501  |

Tablo 55. Perde duvar analizlerinde Grup 10'a ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 10</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,002                       | -0,14722 | 0,01840  | 0,04907  | 0,03067  |
| 712                       | 3,497                       | -0,32512 | 0,08588  | 0,16562  | 0,09201  |
| 1071                      | 3,999                       | -0,34965 | 0,10428  | 0,23309  | 0,21469  |
| Maksimum Yük:<br>8994,62  | 99,964                      | 0,54595  | 30,11930 | 7,75940  | 4,13426  |

Tablo 56. Perde duvar analizlerinde Grup 11'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 11</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,002                       | -0,30058 | 0,01840  | 0,03680  | 0,00000  |
| 712                       | 3,500                       | -0,60729 | 0,09815  | 0,11041  | 0,00613  |
| 1071                      | 4,498                       | -0,70544 | 0,28218  | 0,21469  | 0,00613  |
| Maksimum Yük:<br>7783,78  | 99,970                      | 0,38033  | 34,27840 | 6,37927  | -0,00613 |

Tablo 57. Perde duvar analizlerinde Grup 12'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No:12</b>         | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,503                       | -0,08588 | 0,19630  | 0,11654  | 0,00613  |
| 712                       | 3,002                       | -0,16563 | 0,44780  | 0,26989  | 0,01227  |
| 1071                      | 4,497                       | -0,34965 | 2,57640  | 0,86488  | 0,38644  |
| Maksimum Yük:<br>7459,30  | 87,630                      | 0,97535  | 29,41390 | 4,37961  | 1,21451  |

Tablo 58. Perde duvar analizlerinde Grup 13'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 13</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,997                       | -0,17789 | 0,07975  | 0,04907  | 0,09201  |
| 712                       | 3,996                       | -0,96308 | 0,43553  | 0,42324  | 1,17771  |
| 1071                      | 5,994                       | -1,53357 | 0,85267  | 0,53365  | 0,85261  |
| Maksimum Yük:<br>5662,27  | 99,802                      | 1,40475  | 27,14420 | 8,85737  | 17,09520 |

Tablo 59. Perde duvar analizlerinde Grup 14'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 14</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 2,002                       | -0,02454 | 0,06134  | -0,00613 | -0,00613 |
| 712                       | 3,002                       | -0,09201 | 0,19016  | 0,02454  | -0,01227 |
| 1071                      | 4,501                       | -0,15949 | 0,68704  | 0,17788  | 0,02454  |
| Maksimum Yük:<br>4535,79  | 99,987                      | 3,25730  | 24,45740 | 13,06520 | 27,45540 |

Tablo 60. Perde duvar analizlerinde Grup 15'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 15</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,499                       | -0,22697 | 0,33125  | 0,09201  | 0,15948  |
| 712                       | 3,497                       | -0,60116 | 0,82199  | 0,22082  | 0,28829  |
| 1071                      | 5,497                       | -1,00602 | 1,39248  | 0,31896  | 0,39257  |
| Maksimum Yük:<br>4942,47  | 99,717                      | -0,06134 | 27,11970 | 15,33480 | 36,01220 |

Tablo 61. Perde duvar analizlerinde Grup 16'ya ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 16</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,501                       | -0,07361 | 0,16563  | 0,00000  | 0,00613  |
| 712                       | 3,501                       | -0,34352 | 0,61343  | -0,00613 | 0,00613  |
| 1071                      | 6,001                       | -0,50915 | 1,26366  | 0,00613  | 0,00613  |
| Maksimum Yük:<br>4780,67  | 98,575                      | 3,10395  | 24,70890 | 1,90765  | 0,00613  |

Tablo 62. Perde duvar analizlerinde Grup 17'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 17</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 2,002                       | -0,13495 | 0,00000  | 0,05521  | -0,00613 |
| 712                       | 3,002                       | -0,21470 | 0,00000  | 0,14108  | -0,00613 |
| 1071                      | 4,497                       | -0,33125 | 0,26377  | 0,47845  | -0,00613 |
| Maksimum Yük:<br>7788,96  | 99,558                      | 1,36794  | 33,94710 | 5,66160  | -0,00613 |

Tablo 63. Perde duvar analizlerinde Grup 18'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 18</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 2,002                       | -0,22700 | 0,04907  | 0,07361  | -0,00613 |
| 712                       | 3,501                       | -0,49688 | 0,19016  | 0,20855  | 0,00000  |
| 1071                      | 4,498                       | -0,69317 | 0,38033  | 0,29443  | -0,00613 |
| Maksimum Yük:<br>6591,44  | 99,975                      | 1,33114  | 22,10180 | 9,17633  | 21,87350 |

Tablo 64. Perde duvar analizlerinde Grup 19'a ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 19</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,007                       | -0,21470 | 0,02454  | 0,07974  | 0,00613  |
| 712                       | 3,005                       | -0,58889 | 0,05521  | 0,18402  | 0,00613  |
| 1071                      | 4,500                       | -0,69317 | 0,19016  | 0,40484  | 0,00613  |
| Maksimum Yük:<br>8254,44  | 99,871                      | 0,88947  | 33,13120 | 6,25045  | -0,00613 |

Tablo 65. Perde duvar analizlerinde Grup 20'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| Grup No: 20              | Düğüm Noktaları (mm) |          |          |         |         |
|--------------------------|----------------------|----------|----------|---------|---------|
| Yük Durumları (kg)       | 0                    | 1        | 2        | 3       | 4       |
| 354                      | 0,501                | -0,03067 | 0,09815  | 0,01227 | 0,07361 |
| 712                      | 2,503                | -0,15949 | 0,55209  | 0,14721 | 0,28216 |
| 1071                     | 3,002                | -0,20243 | 0,69931  | 0,15948 | 0,20855 |
| Maksimum Yük:<br>6473,85 | 78,880               | 1,05510  | 24,87450 | 8,26851 | 7,58765 |

Tablo 66. Perde duvar analizlerinde Grup 21'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| Grup No: 21              | Düğüm Noktaları (mm) |          |          |         |          |
|--------------------------|----------------------|----------|----------|---------|----------|
| Yük Durumları (kg)       | 0                    | 1        | 2        | 3       | 4        |
| 354                      | 1,003                | -0,25151 | 0,22697  | 0,00613 | 0,15948  |
| 712                      | 3,004                | -0,54595 | 0,63183  | 0,00613 | 0,23922  |
| 1071                     | 5,501                | -1,25753 | 1,41088  | 0,08588 | 0,30056  |
| Maksimum Yük:<br>7653,79 | 77,139               | -0,55209 | 23,24280 | 8,91257 | 12,72790 |

Tablo 67. Perde duvar analizlerinde Grup 22'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| Grup No: 22              | Düğüm Noktaları (mm) |          |          |         |          |
|--------------------------|----------------------|----------|----------|---------|----------|
| Yük Durumları (kg)       | 0                    | 1        | 2        | 3       | 4        |
| 354                      | 1,002                | -0,06748 | 0,24537  | 0,01840 | 0,00613  |
| 712                      | 2,499                | -0,10428 | 0,52141  | 0,15948 | -0,01227 |
| 1071                     | 3,496                | -0,12269 | 0,77905  | 0,31283 | -0,00613 |
| Maksimum Yük:<br>5702,61 | 60,734               | 1,61945  | 19,21260 | 9,22540 | 12,95480 |

Tablo 68. Perde duvar analizlerinde Grup 23'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| Grup No: 23              | Düğüm Noktaları (mm) |          |          |          |          |
|--------------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| Yük Durumları (kg)       | 0                    | 1        | 2        | 3        | 4        |
| 354                      | 1,002                | -0,19630 | 0,03681  | 0,07361  | 0,00613  |
| 712                      | 2,100                | -0,34965 | 0,06134  | 0,09814  | 0,04907  |
| 1071                     | 3,998                | -0,49688 | 0,14109  | 0,17174  | 0,17788  |
| Maksimum Yük:<br>7413,04 | 88,470               | 0,38033  | 37,54790 | 17,19950 | 21,23560 |

Tablo 69. Perde duvar analizlerinde Grup 24'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 24</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,503                       | -0,13495 | 0,28218  | 0,12268  | 0,32510  |
| 712                       | 2,501                       | -0,20243 | 0,49074  | 0,22082  | 0,58272  |
| 1071                      | 3,498                       | -0,26377 | 0,79132  | 0,33737  | 0,74220  |
| Maksimum Yük:<br>6072,03  | 63,493                      | 1,19005  | 18,30470 | 4,71084  | -1,95058 |

Tablo 70. Perde duvar analizlerinde Grup 25'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 25</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,002                       | -0,19016 | 0,01840  | 0,01227  | 0,00613  |
| 712                       | 2,000                       | -0,34965 | 0,04294  | 0,07361  | -0,00613 |
| 1071                      | 4,498                       | -0,60116 | 0,10428  | 0,09814  | 0,00613  |
| Maksimum Yük:<br>7989,83  | 81,218                      | 0,61956  | 25,06470 | 3,81529  | 0,00000  |

Tablo 71. Perde duvar analizlerinde Grup 26'ya ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 26</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 2,503                       | -0,18403 | 0,13495  | 0,08587  | 0,04907  |
| 712                       | 4,002                       | -0,32512 | 0,34965  | 0,18402  | 0,12881  |
| 1071                      | 5,495                       | -0,47234 | 0,55822  | 0,25149  | 0,17788  |
| Maksimum Yük:<br>3966,93  | 41,229                      | 2,79723  | 21,73990 | 19,03350 | 52,07690 |

Tablo 72. Perde duvar analizlerinde Grup 27'ye ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| <b>Grup No: 27</b>        | <b>Düğüm Noktaları (mm)</b> |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Yük Durumları (kg)</b> | <i>0</i>                    | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| 354                       | 1,498                       | -0,07361 | 0,14722  | 0,06747  | 0,00613  |
| 712                       | 1,501                       | -0,08588 | 0,14722  | 0,09201  | 0,06134  |
| 1071                      | 1,996                       | -0,09815 | 0,20857  | 0,12881  | 0,10428  |
| Maksimum Yük:<br>6852,13  | 99,500                      | 1,71146  | 37,83620 | 15,10780 | 30,9088  |

Tablo 73. Perde duvar analizlerinde Grup 28'e ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| Grup No: 28              | Düğüm Noktaları (mm) |          |          |          |          |
|--------------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| Yük Durumları (kg)       | 0                    | 1        | 2        | 3        | 4        |
| 354                      | 1,004                | -0,24537 | 0,03067  | 0,05521  | 0,00613  |
| 712                      | 1,999                | -0,47234 | 0,09201  | 0,11041  | -0,00613 |
| 1071                     | 3,999                | -0,74838 | 0,19016  | 0,20242  | -0,00613 |
| Maksimum Yük:<br>8609,40 | 98,505               | -0,17176 | 32,43810 | 23,40090 | 30,20950 |

Tablo 74. Perde duvar analizlerinde Grup 29'a ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| Grup No: 29              | Düğüm Noktaları (mm) |          |          |         |          |
|--------------------------|----------------------|----------|----------|---------|----------|
| Yük Durumları (kg)       | 0                    | 1        | 2        | 3       | 4        |
| 354                      | 2,002                | -0,09815 | 0,06134  | 0,01227 | -0,01840 |
| 712                      | 3,498                | -0,15949 | 0,50301  | 0,18402 | 0,18402  |
| 1071                     | 6,995                | -0,22083 | 1,77894  | 0,63179 | 0,76061  |
| Maksimum Yük:<br>6876,16 | 90,402               | 2,36783  | 32,51780 | 8,01089 | 3,46566  |

Tablo 75. Perde duvar analizlerinde Grup 30'a ait maksimum yük ve yer değiştirme değerleri

| Grup No: 30              | Düğüm Noktaları (mm) |          |          |          |          |
|--------------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| Yük Durumları (kg)       | 0                    | 1        | 2        | 3        | 4        |
| 354                      | 1,499                | -0,15336 | 0,25764  | 0,06134  | 0,13495  |
| 712                      | 2,001                | -0,20243 | 0,36192  | 0,09814  | 0,19015  |
| 1071                     | 3,000                | -0,29445 | 0,67477  | 0,28829  | 0,57659  |
| Maksimum Yük:<br>5471,54 | 55,487               | 1,45996  | 18,86290 | 11,24960 | 17,86190 |

### 3.4. SAP 2000 Analizlerine Ait Bulgular

Çalışma kapsamında 30 adet CLT duvara uygulanan modal analizlerden sonra her bir numuneye deneysel olarak uygulanan maksimum yükler yanal yükleme şeklinde yüklenerek uygulanan bu yüklemelere karşılık gelen yer değiştirmeler incelenmiştir. Her numuneden bir adet yer değiştirme incelenerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Referans alınan yer değiştirme noktası her grupta aynı olmamakla birlikte değişkenlik gösterebilmektedir. Yapılan deneysel ve sonlu eleman analizlerinden sonra her grup için elde edilen frekans değerleri Tablo 76'da ve yanal yük testleri sonucunda maksimum yükler ve yer değiştirmeler Tablo 77'de gösterilmiştir.

Tablo 76. Modellere ait frekans değerlerinin deneysel ve numerik şekilde karşılaştırılmalı halleri

| Grup No | Ağaç Türü | Tabaka Kombinasyonu | Modal Analiz |          |        |          |          |        |
|---------|-----------|---------------------|--------------|----------|--------|----------|----------|--------|
|         |           |                     | 1. Mod       |          |        | 2. Mod   |          |        |
|         |           |                     | Deneysel     | Fark (%) | Analiz | Deneysel | Fark (%) | Analiz |
| 1       | Ladin     | C16 - C16 - C16     | 63,03        | 2,54     | 64,63  | 177,2    | 1,19     | 179,31 |
| 2       |           | C22 - C22 - C22     | 62,03        | 1,66     | 63,06  | 177,1    | 2,61     | 172,48 |
| 3       |           | C30 - C30 - C30     | 62,09        | 0,69     | 62,52  | 184,7    | 0,42     | 183,93 |
| 4       |           | C16 - C22 - C16     | 67,91        | 3,75     | 65,36  | 170,1    | 3,7      | 176,4  |
| 5       |           | C22 - C16 - C22     | 61,49        | 1,20     | 60,75  | 169,8    | 0,99     | 171,48 |
| 6       |           | C16 - C30 - C16     | 64,18        | 3,19     | 66,23  | 141,3    | 2,26     | 144,5  |
| 7       |           | C30 - C16 - C30     | 69,04        | 4,77     | 65,75  | 178,9    | 4,57     | 187,08 |
| 8       |           | C22 - C30 - C22     | 64,15        | 3,23     | 66,22  | 174,8    | 4,46     | 182,6  |
| 9       |           | C30 - C22 - C30     | 63,51        | 0,25     | 63,35  | 185,8    | 4,33     | 177,76 |
| 10      | Kızılağaç | D18 - D18 - D18     | 60,81        | 4,47     | 63,53  | 189,6    | 4,2      | 181,63 |
| 11      |           | D30 - D30 - D30     | 61,98        | 3,13     | 63,92  | 189,6    | 4,69     | 180,7  |
| 12      |           | D40 - D40 - D40     | 59,58        | 2,74     | 57,95  | 180,4    | 4,84     | 171,67 |
| 13      |           | D18 - D30 - D18     | 74,03        | 4,39     | 70,78  | 176,3    | 1,79     | 179,45 |
| 14      |           | D30 - D18 - D30     | 65,84        | 0,59     | 65,45  | 175,3    | 1,48     | 172,7  |
| 15      |           | D18 - D40 - D18     | 73,44        | 2,03     | 71,95  | 186,5    | 0,08     | 186,65 |
| 16      |           | D40 - D18 - D40     | 63,07        | 2,74     | 61,34  | 177,4    | 2,69     | 182,18 |
| 17      |           | D30 - D40 - D30     | 60,58        | 2,44     | 62,06  | 177      | 0,85     | 178,5  |
| 18      |           | D40 - D30 - D40     | 74,5         | 3,6      | 77,18  | 173,7    | 3,12     | 179,12 |
| 19      | Hibrit    | C16 - D18 - C16     | 68,23        | 3,28     | 65,99  | 177,7    | 3,04     | 183,1  |
| 20      |           | C22 - D30 - C22     | 65,6         | 2,13     | 64,2   | 176,5    | 3,13     | 182,02 |
| 21      |           | C30 - D40 - C30     | 43,85        | 3,76     | 45,5   | 174      | 4,74     | 165,75 |
| 22      |           | D18 - C16 - D18     | 64,44        | 0,68     | 64,88  | 175,8    | 3,85     | 182,57 |
| 23      |           | D30 - C22 - D30     | 63           | 4,51     | 65,84  | 192,4    | 4,29     | 184,15 |
| 24      |           | D40 - C30 - D40     | 66,97        | 1,45     | 66     | 183      | 1,64     | 186    |
| 25      |           | C16 - D30 - C16     | 65,62        | 3,66     | 63,22  | 174,4    | 0,67     | 173,24 |
| 26      |           | C16 - D40 - C16     | 76,84        | 4,18     | 80,05  | 157,6    | 3,13     | 162,54 |
| 27      |           | C22 - D40 - C22     | 54,91        | 3,46     | 56,81  | 182      | 2,77     | 176,96 |
| 28      |           | D18 - C22 - D18     | 64,03        | 0,3      | 64,22  | 184,4    | 4,03     | 176,97 |
| 29      |           | D18 - C30 - D18     | 40,95        | 0,27     | 41,06  | 174,9    | 2,74     | 170,11 |
| 30      |           | D30 - C30 - D30     | 42,42        | 3,09     | 43,73  | 183,8    | 3,96     | 176,52 |

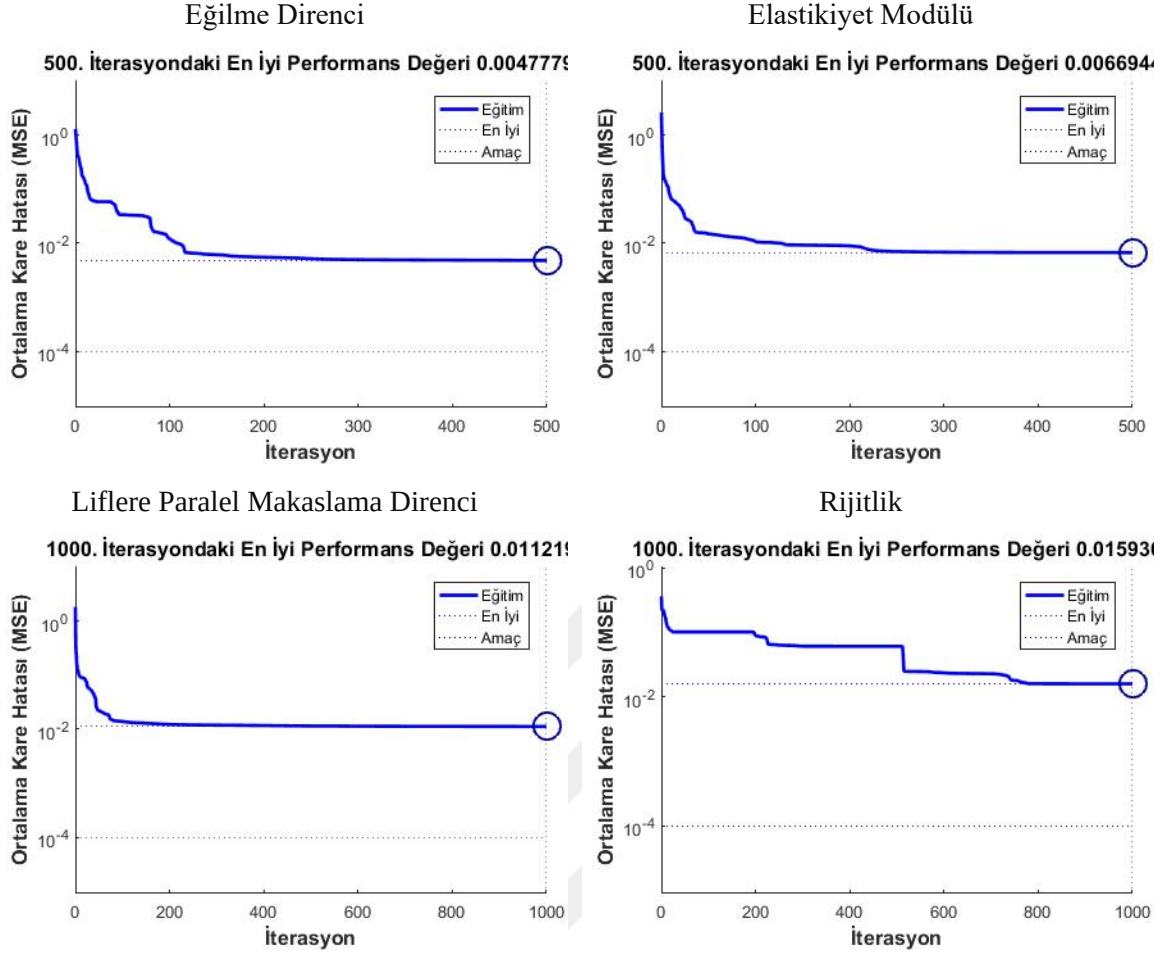
Tablo 77. Yanal yük testleri sonrası maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması

| Grup No | Ağaç Türü | Tabaka Kombinasyonu | Yanal Yük         |                              |                           |               |
|---------|-----------|---------------------|-------------------|------------------------------|---------------------------|---------------|
|         |           |                     | Maksimum Yük (kN) | Deneyisel Yerdeğiştirme (cm) | Analiz Yerdeğiştirme (cm) | LVDT Numarası |
| 1       | Ladin     | C16 - C16 - C16     | 72,2              | 1,37                         | 1,32                      | 3             |
| 2       |           | C22 - C22 - C22     | 78,54             | 2,9                          | 2,98                      | 4             |
| 3       |           | C30 - C30 - C30     | 65,45             | 5,53                         | 5,19                      | 4             |
| 4       |           | C16 - C22 - C16     | 79,43             | 2,85                         | 2,81                      | 4             |
| 5       |           | C22 - C16 - C22     | 59,22             | 3,16                         | 3,12                      | 4             |
| 6       |           | C16 - C30 - C16     | 53,52             | 1,05                         | 1,2                       | 4             |
| 7       |           | C30 - C16 - C30     | 80,94             | 0,46                         | 0,46                      | 3             |
| 8       |           | C22 - C30 - C22     | 89,45             | 3,44                         | 3,3                       | 4             |
| 9       |           | C30 - C22 - C30     | 92,43             | 0,75                         | 0,76                      | 3             |
| 10      | Kızlağaç  | D18 - D18 - D18     | 88,2              | 0,41                         | 0,46                      | 4             |
| 11      |           | D30 - D30 - D30     | 76,33             | 0,64                         | 0,64                      | 3             |
| 12      |           | D40 - D40 - D40     | 73,15             | 0,44                         | 0,42                      | 3             |
| 13      |           | D18 - D30 - D18     | 56,62             | 1,71                         | 1,73                      | 4             |
| 14      |           | D30 - D18 - D30     | 44,47             | 2,75                         | 2,63                      | 4             |
| 15      |           | D18 - D40 - D18     | 48,46             | 3,6                          | 3,62                      | 4             |
| 16      |           | D40 - D18 - D40     | 46,88             | 0,2                          | 0,21                      | 3             |
| 17      |           | D30 - D40 - D30     | 76,37             | 0,57                         | 0,55                      | 3             |
| 18      |           | D40 - D30 - D40     | 64,64             | 2,19                         | 2,3                       | 4             |
| 19      | Hibrit    | C16 - D18 - C16     | 80,94             | 0,63                         | 0,58                      | 3             |
| 20      |           | C22 - D30 - C22     | 63,48             | 0,76                         | 0,75                      | 4             |
| 21      |           | C30 - D40 - C30     | 75,05             | 1,27                         | 1,28                      | 4             |
| 22      |           | D18 - C16 - D18     | 55,92             | 1,3                          | 1,33                      | 4             |
| 23      |           | D30 - C22 - D30     | 72,7              | 2,12                         | 2,15                      | 4             |
| 24      |           | D40 - C30 - D40     | 59,55             | 0,47                         | 0,46                      | 3             |
| 25      |           | C16 - D30 - C16     | 78,35             | 0,38                         | 0,37                      | 3             |
| 26      |           | C16 - D40 - C16     | 38,89             | 5,21                         | 5,3                       | 4             |
| 27      |           | C22 - D40 - C22     | 67,2              | 3,1                          | 3,12                      | 4             |
| 28      |           | D18 - C22 - D18     | 84,43             | 3,02                         | 3,06                      | 4             |
| 29      |           | D18 - C30 - D18     | 67,43             | 0,8                          | 0,81                      | 3             |
| 30      |           | D30 - C30 - D30     | 53,65             | 1,79                         | 1,75                      | 4             |

Tablolar incelendiğinde, maksimum yük ve maksimum yükteki yerdeğiştirme deneysel verileri ile SAP 2000 programında yapılan sonlu eleman modelleri ve analiz sonuçları birbirleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

### 3.5. Yapay Sinir Ağları Analizlerine Ait Bulgular

Çalışma kapsamında, tahribatlı yapısal direnç değerlerinden yararlanılarak yüksek güvenilirlik ve doğruluk sağlayan yapay sinir ağı (YSA) tahmin modelleri geliştirilmiştir. Analiz sürecinde birçok model eğitilmiş ve test edilmiştir. En iyi tahmin performansını gösteren modellerin seçimi, ortalama karesel hata (MSE) değerlerine dayanmıştır. MSE değerlerinin iterasyonlara göre değişimi, çıktı değişkenleri için Şekil 32’de gösterilmiştir.



Şekil 32. Belirlenen tahmin modellerinin iterasyona bağlı olarak MSE değişimleri

Şekillerden de görüleceği üzere, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerine ait tahmin modellerinin en iyi performansları 500. İterasyonda sırasıyla 0,0047779 ve 0,0066944 olarak tespit edilmiştir. Liflere paralel makaslama direnci ve rijitlik tahmin modellerinde ise en iyi performanslar, 1000. İterasyonda sırasıyla 0,011219 ve 0,015936 olarak belirlenmiştir.

Yüksek performans sergileyen tahmin modellerinde kullanılan eğitim ve test veri setlerine ait deneysel bulgular, tahmin sonuçları ve hata oranları Tablo 78 ve Tablo 79'da sunulmuştur. Ayrıca modeller için belirlenen MAPE ve RMSE değerleri Tablo 78 ve 79'da gösterilmiştir.

Tablo 78. Eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerine ait eğitim ve test verileri

| EĞİTİM VERİLERİ |                     |                                     |        |          |                                         |          |          |
|-----------------|---------------------|-------------------------------------|--------|----------|-----------------------------------------|----------|----------|
| Ağaç Türü       | Tabaka Kombinasyonu | Eğilme Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) |        |          | Elastikiyet Modülü (N/mm <sup>2</sup> ) |          |          |
|                 |                     | Gerçek                              | Tahmin | Hata (%) | Gerçek                                  | Tahmin   | Hata (%) |
| Ladin           | C22 - C22 - C22     | 20,35                               | 20,35  | 0,01     | 12405,00                                | 12614,38 | -1,69    |
| Ladin           | C30 - C30 - C30     | 19,60                               | 19,60  | -0,02    | 13291,38                                | 13254,22 | 0,28     |
| Ladin           | C22 - C16 - C22     | 13,55                               | 13,56  | -0,05    | 10667,49                                | 10737,61 | -0,66    |
| Ladin           | C16 - C30 - C16     | 16,69                               | 16,69  | -0,01    | 8904,05                                 | 8946,12  | -0,47    |
| Ladin           | C30 - C16 - C30     | 18,73                               | 18,70  | 0,14     | 12805,93                                | 12935,29 | -1,01    |
| Ladin           | C30 - C22 - C30     | 19,24                               | 19,26  | -0,10    | 13087,41                                | 12738,68 | 2,66     |
| Kızılağaç       | D18 - D18 - D18     | 10,18                               | 10,18  | 0,00     | 9846,02                                 | 9845,94  | 0,00     |
| Kızılağaç       | D40 - D40 - D40     | 16,45                               | 16,45  | 0,00     | 13340,39                                | 12859,24 | 3,61     |
| Kızılağaç       | D18 - D30 - D18     | 14,89                               | 14,89  | 0,01     | 10651,16                                | 9735,28  | 8,60     |
| Kızılağaç       | D30 - D18 - D30     | 9,79                                | 9,76   | 0,31     | 6712,05                                 | 6744,93  | -0,49    |
| Kızılağaç       | D30 - D40 - D30     | 12,00                               | 12,00  | 0,00     | 9091,04                                 | 9867,87  | -8,55    |
| Kızılağaç       | D40 - D30 - D40     | 9,77                                | 9,76   | 0,11     | 10138,68                                | 10000,39 | 1,36     |
| Hibrit          | C16 - D18 - C16     | 11,77                               | 11,91  | -1,17    | 11312,98                                | 11309,58 | 0,03     |
| Hibrit          | C22 - D30 - C22     | 15,47                               | 14,29  | 7,61     | 12998,63                                | 13144,50 | -1,12    |
| Hibrit          | D18 - C16 - D18     | 11,44                               | 11,27  | 1,53     | 9461,30                                 | 9403,35  | 0,61     |
| Hibrit          | D40 - C30 - D40     | 10,88                               | 10,88  | 0,00     | 10221,66                                | 10345,54 | -1,21    |
| Hibrit          | C16 - D30 - C16     | 10,77                               | 10,77  | 0,00     | 11539,11                                | 11539,38 | 0,00     |
| Hibrit          | C22 - D40 - C22     | 10,03                               | 10,11  | -0,77    | 11351,45                                | 11880,85 | -4,66    |
| Hibrit          | D18 - C22 - D18     | 13,24                               | 14,35  | -8,37    | 9097,35                                 | 9158,31  | -0,67    |
| Hibrit          | D30 - C30 - D30     | 12,51                               | 12,58  | -0,52    | 10307,80                                | 10174,38 | 1,29     |
| MAPE            |                     | 1,04                                |        |          | 1,95                                    |          |          |
| RMSE            |                     | 0,37                                |        |          | 333,62                                  |          |          |
| TEST VERİLERİ   |                     |                                     |        |          |                                         |          |          |
| Ağaç Türü       | Tabaka Kombinasyonu | Eğilme Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) |        |          | Elastikiyet Modülü (N/mm <sup>2</sup> ) |          |          |
|                 |                     | Gerçek                              | Tahmin | Hata (%) | Gerçek                                  | Tahmin   | Hata (%) |
| Ladin           | C16 - C16 - C16     | 16,96                               | 16,19  | 4,57     | 10109,14                                | 10187,12 | -0,77    |
| Ladin           | C16 - C22 - C16     | 13,77                               | 14,21  | -3,16    | 11094,82                                | 10946,03 | 1,34     |
| Ladin           | C22 - C30 - C22     | 17,19                               | 18,47  | -7,47    | 11757,49                                | 10755,48 | 8,52     |
| Kızılağaç       | D30 - D30 - D30     | 11,56                               | 11,76  | -1,73    | 12252,38                                | 13186,77 | -7,63    |
| Kızılağaç       | D18 - D40 - D18     | 14,92                               | 16,19  | -8,48    | 10236,47                                | 9405,92  | 8,11     |
| Kızılağaç       | D40 - D18 - D40     | 11,90                               | 11,76  | 1,18     | 10531,10                                | 10570,54 | -0,37    |
| Hibrit          | C30 - D40 - C30     | 16,65                               | 16,42  | 1,38     | 14867,10                                | 15463,17 | -4,01    |
| Hibrit          | C16 - D40 - C16     | 12,98                               | 11,87  | 8,51     | 10661,48                                | 10136,07 | 4,93     |
| Hibrit          | D30 - C22 - D30     | 9,83                                | 9,76   | 0,72     | 8983,15                                 | 8611,02  | 4,14     |
| Hibrit          | D18 - C30 - D18     | 14,25                               | 14,51  | -1,83    | 8606,04                                 | 8843,59  | -2,76    |
| MAPE            |                     | 3,90                                |        |          | 4,26                                    |          |          |
| RMSE            |                     | 0,74                                |        |          | 585,06                                  |          |          |

Tablo 79. Liflere paralel makaslama direnci ve rijitlik değerlerine ait eğitim ve test verileri

| EĞİTİM VERİLERİ |                     |                                                        |        |          |                  |        |          |
|-----------------|---------------------|--------------------------------------------------------|--------|----------|------------------|--------|----------|
| Ağaç Türü       | Tabaka Kombinasyonu | Liflere Paralel Makaslama Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) |        |          | Rijitlik (kN/mm) |        |          |
|                 |                     | Gerçek                                                 | Tahmin | Hata (%) | Gerçek           | Tahmin | Hata (%) |
| Ladin           | C22-C22-C22         | 2,47                                                   | 2,34   | 5,29     | 1,79             | 1,76   | 1,46     |
| Ladin           | C30-C30-C30         | 2,51                                                   | 2,51   | -0,04    | 1,40             | 1,40   | -0,10    |
| Ladin           | C22-C16-C22         | 1,90                                                   | 1,90   | 0,00     | 1,24             | 1,24   | -0,09    |
| Ladin           | C16-C30-C16         | 2,34                                                   | 2,34   | 0,02     | 1,34             | 1,36   | -1,82    |
| Ladin           | C30-C16-C30         | 2,09                                                   | 2,09   | 0,00     | 2,08             | 2,08   | 0,01     |
| Ladin           | C30-C22-C30         | 2,45                                                   | 2,45   | -0,08    | 1,23             | 1,23   | -0,07    |
| Kızılağaç       | D18-D18-D18         | 2,23                                                   | 2,34   | -4,91    | 1,84             | 1,88   | -2,13    |
| Kızılağaç       | D40-D40-D40         | 2,18                                                   | 2,17   | 0,39     | 1,36             | 1,36   | -0,11    |
| Kızılağaç       | D18-D30-D18         | 2,56                                                   | 2,56   | -0,03    | 1,06             | 1,06   | 0,06     |
| Kızılağaç       | D30-D18-D30         | 2,85                                                   | 2,85   | 0,00     | 1,77             | 1,77   | 0,00     |
| Kızılağaç       | D30-D40-D30         | 2,69                                                   | 2,66   | 0,99     | 1,28             | 1,28   | 0,22     |
| Kızılağaç       | D40-D30-D40         | 3,01                                                   | 2,84   | 5,68     | 1,84             | 1,84   | -0,01    |
| Hibrit          | C16-D18-C16         | 2,47                                                   | 2,46   | 0,39     | 1,73             | 1,89   | -9,18    |
| Hibrit          | C22-D30-C22         | 1,69                                                   | 1,74   | -2,72    | 1,83             | 1,89   | -3,11    |
| Hibrit          | D18-C16-D18         | 2,23                                                   | 2,31   | -3,79    | 2,05             | 1,89   | 7,86     |
| Hibrit          | D40-C30-D40         | 1,67                                                   | 1,68   | -0,32    | 1,39             | 1,39   | 0,00     |
| Hibrit          | C16-D30-C16         | 2,25                                                   | 2,15   | 4,35     | 2,04             | 1,89   | 7,47     |
| Hibrit          | C22-D40-C22         | 2,39                                                   | 2,26   | 5,35     | 1,92             | 1,92   | 0,00     |
| Hibrit          | D18-C22-D18         | 2,10                                                   | 2,12   | -1,05    | 1,83             | 1,89   | -3,21    |
| Hibrit          | D30-C30-D30         | 2,38                                                   | 2,38   | -0,06    | 2,58             | 2,58   | 0,01     |
| MAPE            |                     | 1,77                                                   |        |          | 1,85             |        |          |
| RMSE            |                     | 0,07                                                   |        |          | 0,06             |        |          |
| TEST VERİLERİ   |                     |                                                        |        |          |                  |        |          |
| Ağaç Türü       | Tabaka Kombinasyonu | Liflere Paralel Makaslama Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) |        |          | Rijitlik (kN/mm) |        |          |
|                 |                     | Gerçek                                                 | Tahmin | Hata (%) | Gerçek           | Tahmin | Hata (%) |
| Ladin           | C16-C16-C16         | 2,42                                                   | 2,34   | 3,33     | 1,32             | 1,32   | 0,29     |
| Ladin           | C16-C22-C16         | 2,51                                                   | 2,34   | 6,79     | 1,71             | 1,56   | 8,65     |
| Ladin           | C22-C30-C22         | 2,43                                                   | 2,42   | 0,28     | 1,54             | 1,55   | -0,81    |
| Kızılağaç       | D30-D30-D30         | 2,87                                                   | 2,69   | 6,25     | 1,44             | 1,43   | 0,65     |
| Kızılağaç       | D18-D40-D18         | 1,81                                                   | 1,76   | 2,53     | 1,48             | 1,56   | -5,68    |
| Kızılağaç       | D40-D18-D40         | 2,43                                                   | 2,36   | 2,83     | 1,42             | 1,39   | 2,09     |
| Hibrit          | C30-D40-C30         | 3,37                                                   | 3,12   | 7,31     | 1,27             | 1,39   | -9,52    |
| Hibrit          | C16-D40-C16         | 1,73                                                   | 1,74   | -0,41    | 1,77             | 1,82   | -3,07    |
| Hibrit          | D30-C22-D30         | 2,23                                                   | 2,26   | -1,36    | 2,02             | 1,89   | 6,48     |
| Hibrit          | D18-C30-D18         | 1,55                                                   | 1,54   | 0,53     | 1,55             | 1,54   | 0,72     |
| MAPE            |                     | 3,16                                                   |        |          | 3,80             |        |          |
| RMSE            |                     | 0,12                                                   |        |          | 0,08             |        |          |

Yapılan incelemelere göre, CLT panellerdeki deneysel veriler ile tahmin edilen veriler arasında yakın bir ilişki bulunmuş ve hata oranları düşük seviyelerde kalmıştır. CLT panellerin eğilme direnci verilerindeki en yüksek hata oranları sırasıyla, ladin için %7,47, kızılğaç için %8,48 ve hibrit için %8,51 olarak tespit edilmiştir. CLT panellerin elastikiyet modülü verilerinde en yüksek hata oranları, ladin için %8,52, kızılğaç için %8,60 ve hibrit

için %4,93 olarak hesaplanmıştır. CLT panellerin liflere paralel makaslama direnci verilerinde en yüksek hata oranları, ladin için %6,79, kızılâğaç için %6,25 ve hibrit için %7,31 olarak hesaplanmıştır. CLT panellerin rijitlik verilerinde ise en yüksek hata oranları, ladin için %8,65, kızılâğaç için %5,68 ve hibrit için %9,52 olarak hesaplanmıştır.

Eğilme direnci, elastikiyet modülü, liflere paralel makaslama direnci ve rijitlik değerlerine ait tahmin modellerinin bağlantı ağırlıkları ve eşik değerleri sırasıyla Tablo 80-83 arasında verilmiştir.

Tablo 80. Eğilme direnci değerlerinin tahmin modelinin bağlantı ağırlıkları ve eşikleri

|                |        |        |        |        |       |
|----------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Gizli Katman 1 | Nöron1 | Nöron2 | Nöron3 | Nöron4 | Eşik1 |
|                | 1,26   | 1,41   | -12,43 | -4,60  | -9,16 |
|                | 10,13  | -3,39  | -0,96  | -4,26  | 1,25  |
|                | -0,75  | 3,19   | 0,08   | 2,82   | -5,90 |
|                | -      | -      | -      | -      | -5,38 |
| Gizli Katman 2 | Nöron1 | Nöron2 | Eşik2  |        |       |
|                | 24,10  | -1,10  | -17,22 |        |       |
|                | 40,59  | 1,65   | -1,03  |        |       |
|                | 41,17  | 3,60   | -      |        |       |
|                | -41,88 | 9,28   | -      |        |       |
| Çıktı Katmanı  | Nöron1 | Eşik3  | -      |        |       |
|                | 0,93   | 0,54   | -      |        |       |
|                | 0,61   | -      | -      |        |       |

Tablo 81. Elastikiyet modülü değerlerinin tahmin modelinin bağlantı ağırlıkları ve eşikleri

|                |        |        |        |        |        |       |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Gizli Katman 1 | Nöron1 | Nöron2 | Nöron3 | Eşik1  |        |       |
|                | -9,50  | -2,56  | 4,53   | -10,80 |        |       |
|                | -0,15  | -1,27  | -4,90  | 0,18   |        |       |
|                | 1,49   | 1,34   | -3,96  | -6,66  |        |       |
| Gizli Katman 2 | Nöron1 | Nöron2 | Nöron3 | Nöron4 | Nöron5 | Eşik2 |
|                | -1,22  | -1,12  | -3,28  | -6,67  | -0,94  | 3,09  |
|                | -1,04  | -1,02  | 0,74   | 1,57   | 0,34   | 1,72  |
|                | -1,58  | -2,31  | 0,36   | 0,40   | 3,08   | -3,16 |
|                | -      | -      | -      | -      | -      | -6,42 |
|                | -      | -      | -      | -      | -      | -1,62 |
| Çıktı Katmanı  | Nöron1 | Eşik3  |        |        |        |       |
|                | -0,64  | 0,89   |        |        |        |       |
|                | 0,06   | -      |        |        |        |       |
|                | -13,03 | -      |        |        |        |       |
|                | 8,56   | -      |        |        |        |       |
|                | 2,20   | -      |        |        |        |       |

Tablo 82. Liflere paralel makaslama direnci değerlerinin tahmin modelinin bağlantı ağırlıkları ve eşikleri

|                       |               |               |               |              |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| <b>Gizli Katman 1</b> | <b>Nöron1</b> | <b>Nöron2</b> | <b>Eşik1</b>  |              |
|                       | -0,26         | -3,51         | -0,46         |              |
|                       | -0,63         | -2,41         | -5,22         |              |
|                       | -0,40         | -2,54         | -             |              |
| <b>Gizli Katman 2</b> | <b>Nöron1</b> | <b>Nöron2</b> | <b>Nöron3</b> | <b>Eşik2</b> |
|                       | 74,19         | -2,75         | 2,89          | 16,47        |
|                       | -50,94        | -6,63         | 13,10         | -7,44        |
|                       | -             | -             | -             | 13,84        |
| <b>Çıktı Katmanı</b>  | <b>Nöron1</b> | <b>Eşik3</b>  |               |              |
|                       | 14,65         | -14,28        |               |              |
|                       | 11,60         | -             |               |              |
|                       | 11,10         | -             |               |              |

Tablo 83. Rijitlik değerlerinin tahmin modelinin bağlantı ağırlıkları ve eşikleri

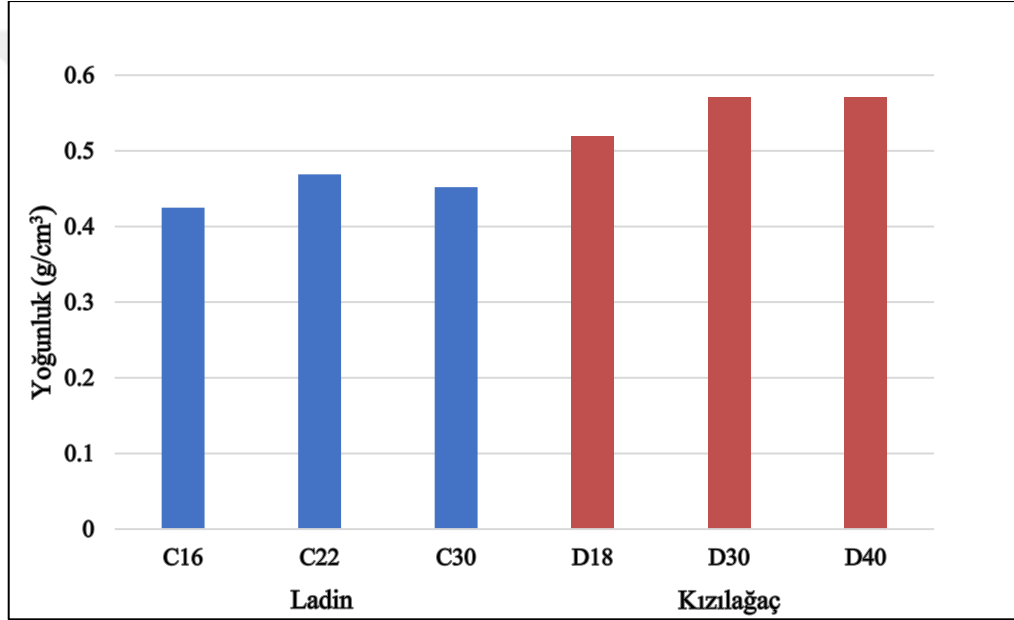
|                       |               |               |              |
|-----------------------|---------------|---------------|--------------|
| <b>Gizli Katman 1</b> | <b>Nöron1</b> | <b>Nöron2</b> | <b>Eşik1</b> |
|                       | -5,69         | -5,19         | 0,70         |
|                       | 14,05         | 0,61          | -3,07        |
|                       | 5,83          | 2,47          | -            |
| <b>Gizli Katman 2</b> | <b>Nöron1</b> | <b>Nöron2</b> | <b>Eşik2</b> |
|                       | 2,37          | -3,10         | -1,40        |
|                       | -3,25         | 4,18          | 1,56         |
| <b>Çıktı Katmanı</b>  | <b>Nöron1</b> | <b>Eşik3</b>  |              |
|                       | -19,08        | -0,46         |              |
|                       | -18,96        | -             |              |

## 4. TARTIŞMA

### 4.1. CLT Üretiminde Kullanılan Kerestelere Ait Tartışma

#### 4.1.1. Tahribatlı Yoğunluk Testlerine Ait Tartışma

CLT üretiminde kullanılan kerestelerin direnç sınıflarına göre tahribatlı yöntemlerle belirlenen yoğunluk değerleri Şekil 33’ de verilmiştir.



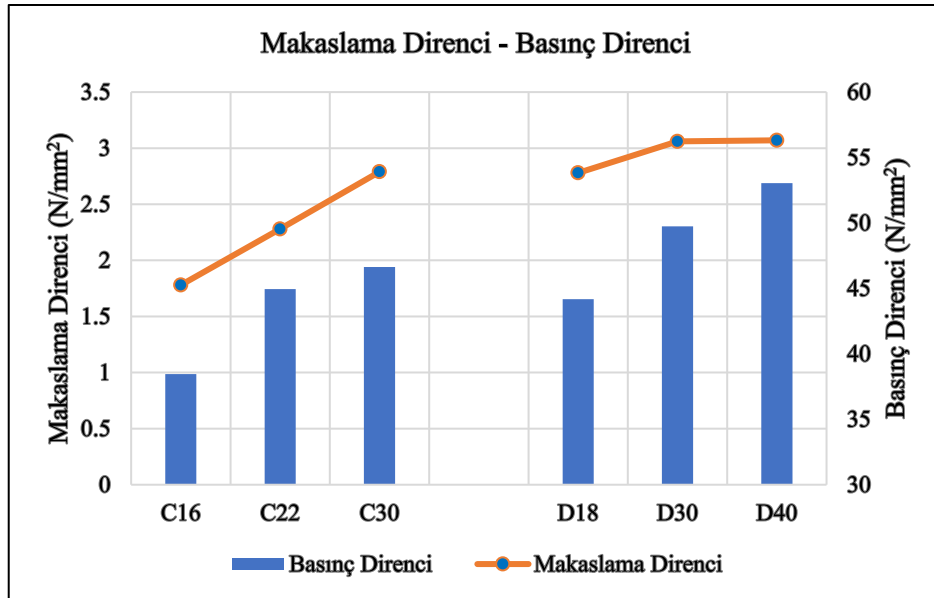
Şekil 33. Kerestelerin direnç sınıflarına göre yoğunluk değerleri değişimleri

Şekil incelendiğinde, en yüksek yoğunluk değerleri ladin kerestelerde C22-C30 direnç sınıfı grubundan, kızılâğaç kerestelerde ise D30-D40 direnç sınıfı grubundan elde edilmiştir. Genel olarak kerestelerin direnç sınıfları yükseldikçe yoğunluk değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kızılâğaç kerestelerin yoğunluk değerlerinin ladin kerestelerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bir ağaç malzemenin yoğunluğu üzerinde etkili olan faktörler; ağaç türü, rutubet, yıllık halka genişliği, ilkbahar ve yaz odunu oranı, ekstraktif maddeler, malzemenin dal, kök ve gövde odunu oluşu şeklinde sıralanabilir (Bozkurt & Erdin, 1995). Literatürde ladin ağacı için hava kurusu yoğunluk değeri 0,470 g/cm<sup>3</sup>, kızılâğaç için ise 0,530 g/cm<sup>3</sup> olarak verilmiştir (Erdin & Bozkurt, 2013). Brezilya'da ABNT

NBR 7190 (1997) standardına göre,  $400 \text{ kg/m}^3$  ile  $750 \text{ kg/m}^3$  arasında %12 görünür yoğunluğa sahip kerestelerin kullanılması yapısal uygulamalar için gerektiği belirtilmektedir. Çalışmada elde edilen yoğunluk değerleri ile literatürde verilen yoğunluk değerlerinin benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. CLT panel üretiminde kullanılacak kerestelerin yoğunluğu, panelin mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yoğunluk, özellikle basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve gerilme özellikleri gibi yapısal özellikleri doğrudan etkileyen bir parametredir. Bu nedenle, CLT üretiminde kullanılacak kerestenin uygun yoğunluk aralığı hem üretim verimliliği hem de ürünün performansı için kritik öneme sahiptir. ANSI/APA PRG 320 (2019) standardına göre CLT üretimi için minimum kereste yoğunluğu  $0,350 \text{ g/cm}^3$  olarak belirlenmiştir. Buna göre çalışmada CLT üretiminde kullanılan kerestelerden elde edilen yoğunlukların ilgili standartta belirtilen sınır değerini karşıladığı tespit edilmiştir.

#### 4.1.2. Tahribatlı Makaslama Direnci ve Basınç Direncine Ait Tartışma

CLT üretiminde kullanılan kerestelerin direnç sınıflarına göre tahribatlı yöntemlerle belirlenen makaslama direnci ve basınç direnci değerleri Şekil 34’ de verilmiştir.

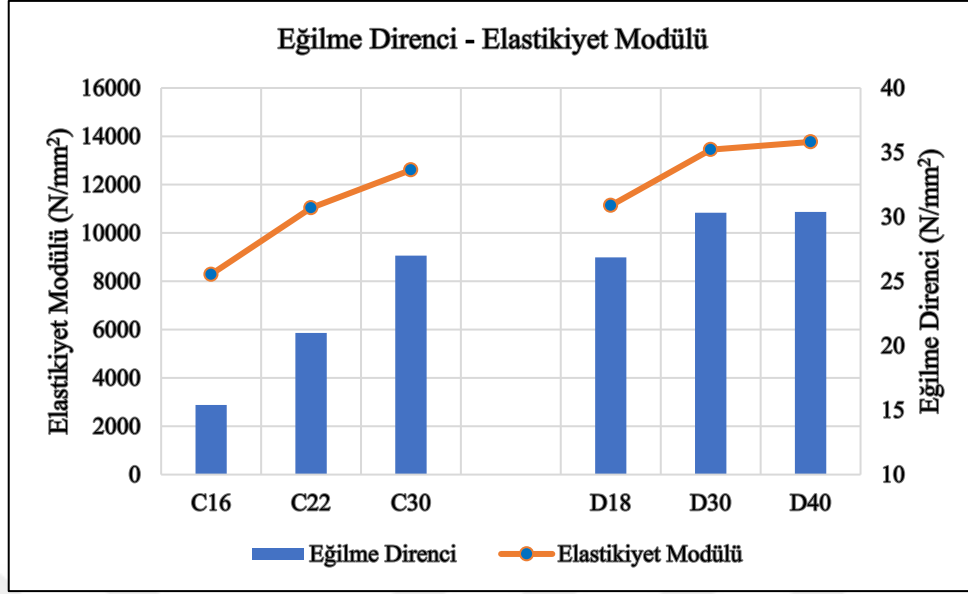


Şekil 34. Kerestelerin direnç sınıflarına göre makaslama direnci ve basınç direnci değerleri değişimleri

Şekil 34 incelendiğinde, en yüksek basınç direnci değerleri ladin kerestelerde C22-C30 direnç sınıfı grubundan, kızılâğaç kerestelerde ise D40 direnç sınıfı grubundan elde edilmiştir. Makaslama direnci değerleri ladin kerestelerde C30 direnç sınıfı grubundan, kızılâğaç kerestelerde ise D40 direnç sınıfı grubundan elde edilmiştir. Genel olarak, kerestelerin direnç sınıfları yükseldikçe basınç direnci ve makaslama direnci değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca ladin ve kızılâğaç kerestelerinin yoğunlukları da basınç direnci ve makaslama direnci ile benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Masif ahşap malzemenin yoğunluğu arttıkça mekanik özellikleri arttığı literatürde belirtilmiştir (Bal & Bektaş, 2018). Makaslama ve basınç direnci gibi masif odunun mekanik özellikleri üzerinde yükün süresi, nem içeriği, kalite, sıcaklık ve boyut gibi faktörlerin önemli derecede etkili olduğu bilinmektedir (Arriaga vd., 2023). Akyüz (1997) tarafından yapılan bir çalışmada ladin kerestelerinin liflere paralel basınç direncini  $38,31 \text{ N/mm}^2$  olarak tespit ederken, Güller ve Ay (1999), kızılâğaç kerestelerin liflere paralel basınç direncini  $41,48 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlemiştir. Lamine edilmiş masif malzemelerde kullanılan ladin kerestelerin basınç direncinin belirlendiği başka bir çalışmada ise ladin kerestesinin liflere paralel basınç direncinin  $40,92 \text{ N/mm}^2$  olduğu belirlenmiştir (Keskin, 2009). Literatürdeki benzer ağaç türlerine ait basınç direnci değerleri ile çalışmadan elde edilen değerleri arasında bir uyum olduğu tespit edilmiştir.

#### 4.1.3. Tahribatlı Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Tartışma

CLT üretiminde kullanılan kerestelerin direnç sınıflarına göre tahribatlı yöntemlerle belirlenen eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri Şekil 35'te verilmiştir.



Şekil 35. Kerestelerin direnç sınıflarına göre eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri değişimleri

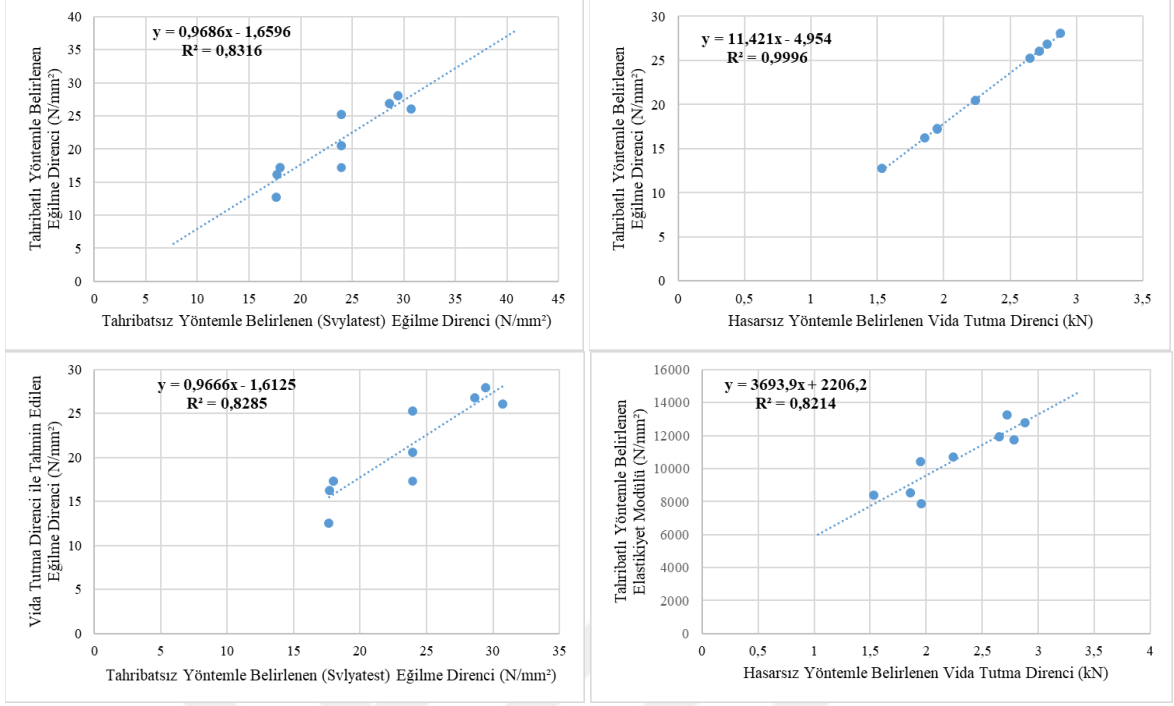
Şekil 35 incelendiğinde, en yüksek eğilme direnci değerleri ladin kerestelerde C30 direnç sınıfı grubundan, kızılâğaç kerestelerde ise D40 direnç sınıfı grubundan elde edilmiştir. Elastikiyet modülü değerleri ladin kerestelerde C30 direnç sınıfı grubundan, kızılâğaç kerestelerde ise D40 direnç sınıfı grubundan elde edilmiştir. Kerestelerin direnç sınıfları yükseldikçe eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan önceki çalışmalarda, birçok araştırmacı masif ahşap malzemelerin eğilme direnci, elastikiyet modülü ve şok direnci ile yoğunluk değerleri arasında artan doğrusal bir ilişki olduğunu belirlemiştir (Kollmann & Cote, 1968; Malkoçoğlu 1994; Bozkurt & Erdin 1995; Bektaş vd., 2002). Çalışmada, ladin ve kızılâğaç kerestelerin yoğunlukları ile eğilme ve elastikiyet modülü değerleri arasında benzer bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Šilinskas vd. (2020), tarafından yapılan bir çalışmada Norveç ladini eğilme direnci değerleri EN 408 standardına göre belirlenmiş ve bu değerleri 13,8-18,0 N/mm<sup>2</sup> arasında olduğu tespit edilmiştir. Aynı çalışmada elastikiyet modülü değerleri ise 7592,1-8682,9 N/mm<sup>2</sup> arasında bulunmuştur. Benzer şekilde, Šilinskas vd. (2024), tarafından yapılan başka bir çalışmada farklı genetiklere sahip adi kızılâğaç kerestelerinin eğilme direnci değerleri EN 408 standardına göre belirlenmiş ve bu değerler 18,26-60,05 N/mm<sup>2</sup> arasında olduğu tespit edilmiştir. Aynı çalışmada elastikiyet modülü değerleri ise 3416-11801 N/mm<sup>2</sup> arasında bulunmuştur. Bu çalışmada, ladin için eğilme direnci değerleri 15,40-26,99 N/mm<sup>2</sup>, elastikiyet modülü değerleri 8286,52-12606,41 N/mm<sup>2</sup> kızılâğaç için

eğilme direnci değerleri 26,85-30,38 N/mm<sup>2</sup>, elastikiyet modülü değerleri 11135,36-13767,38 N/mm<sup>2</sup> olarak bulunan sonuçlar; benzer standarttaki testlerden elde edilen ladin için ve kızılğaç kerestelerin hem eğilme direnci hem de elastikiyet modülü değerlerinin literatürle paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Farklı büyüme koşulları, iklim, ağaç gelişim evresi ve silvikültürel işlemlerden etkilenen odun yoğunluğu, odun kalitesinin en önemli ve ilk değerlendirilen türe özgü parametrelerinden biridir. Ahşap yoğunluğu, elastikiyet modülü ile gösterilen eğilme direnci ve sertlik gibi bazı ahşap mekanik özellikleri ile ilişkili olduğu belirtilmektedir (Machado vd., 2014; Moreno-Fernández vd., 2018).

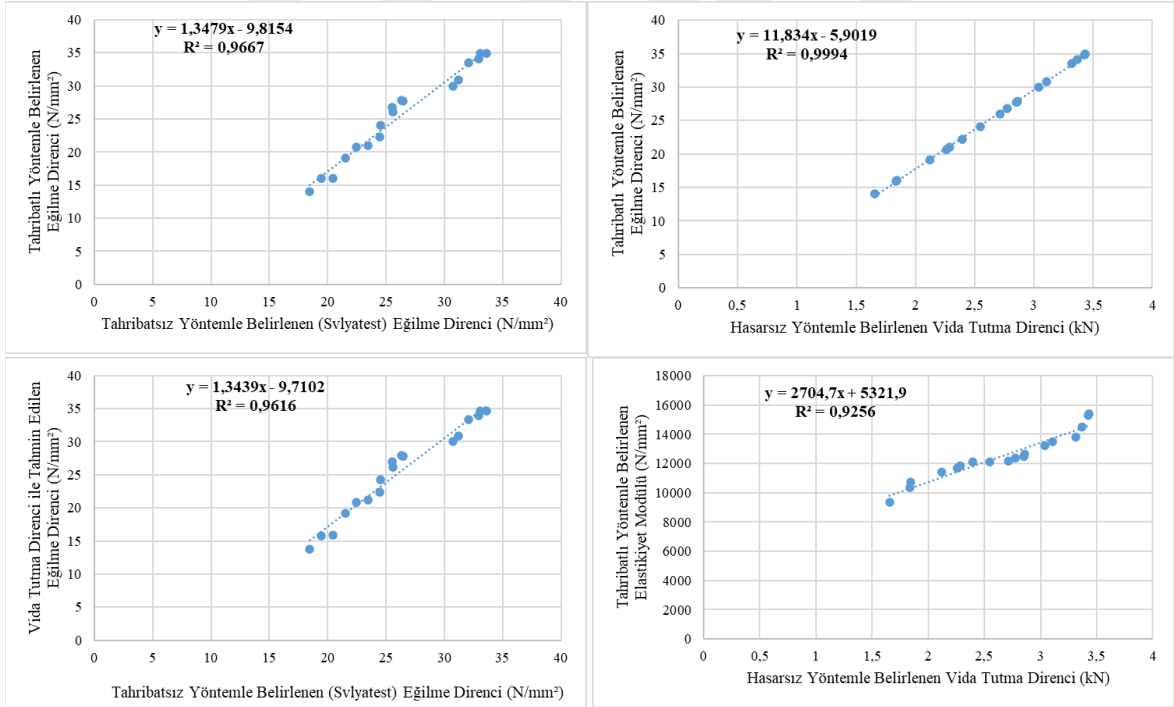
Kerestelerin mekanik direnç değerleri (makaslama, basınç ve eğilme direnci ile elastikiyet modülü) genel olarak incelendiğinde, kızılğaç kerestelerin ladin kerestelerden daha iyi değer verdiği gözlemlenmiştir. Sert ağaç türlerinin mekanik özellikleri yumuşak ağaç türleri ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. Sert ağaçların eğilme direnci %175 e kadar, liflere paralel basınç direnci ise %150 ye kadar yumuşak ağaç türlerinden yüksektir (Franke, 2016).

#### **4.2. CLT Üretiminde Kullanılan Kerestelerin Tahribatlı ve Tahribatsız Test Sonuçlarına Ait Regresyon Modelleri**

Ladin ve kızılğaç keresteler üzerine yapılan tahribatlı ve tahribatsız testler ile elde edilen verilerin aralarındaki ilişkiyi ortaya koymak için regresyon analizi yapılmış ve tahribatlı ile tahribatsız test sonuçlarının birbiriyle yüksek oranda uyumlu olduğu belirlenmiştir. Tahribatsız testler sonucu bulunan eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerinin hesaplanması için çalışmada kullanılan akustik test cihazının (Sylvatest 4) yanında ayrıca tahribatsız ölçüm aletlerinden bir diğeri olan vida tutma/çekme cihazı ile belirlenen sonuçlardan da yararlanılarak verilerin birbiriyle uyumu başarıyla tespit edilmiştir. Kerestelerden elde edilen tahribatlı ve tahribatsız test verilerin regresyon analizlerine ait grafikler aşağıda verilmiştir.



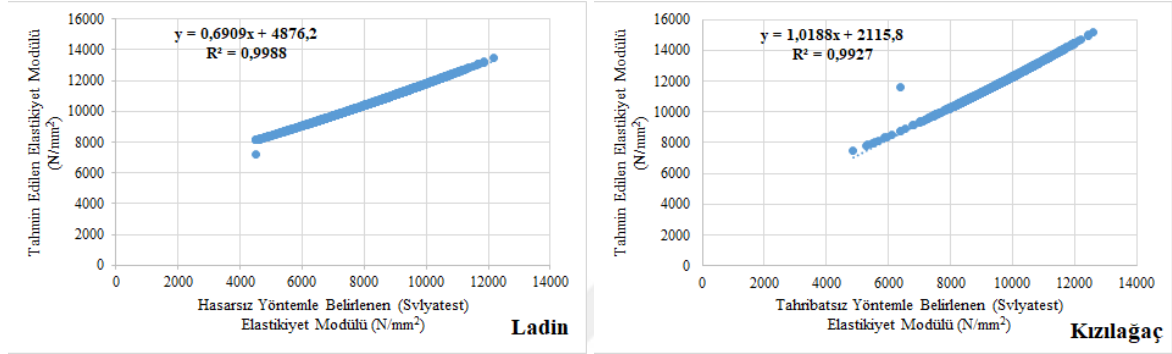
Şekil 36. Ladin kerestelere ait regresyon grafikleri



Şekil 37. Kızılağaç kerestelere ait regresyon grafikleri

Li vd., (2021) göknar kerestelerine yapmış olduğu tahribatsız testler sonucunda; elastikiyet modülü ile yoğunluk, eğilme direnci ve yoğunluk ile elastikiyet modülü ve eğilme direnci arasındaki korelasyon değerlerini ( $R^2$ ) 0,6'dan büyük bulmuş ve bu değerlerin

kurulan modellerin başarısını kanıtladığını ifade etmiştir. Çalışmada yüksek oranlarda hesaplanan belirleme katsayıları ( $R^2$ ) elde edilen tahribatlı ve tahribatsız test verileri arasındaki ilişkinin başarılı düzeyde olduğunu kanıtlanmıştır. Ayrıca tahribatsız olarak hesaplanan elastikiyet modülü değerleri de kurulan regresyon modelleriyle hesaplanan elastikiyet modülü değerleriyle oldukça uyumlu bulunmuştur (Şekil 38).



Şekil 38. Kurulan regresyon modelleriyle hesaplanan elastikiyet modülü değerlerinin tahribatsız yöntemler ile karşılaştırılması

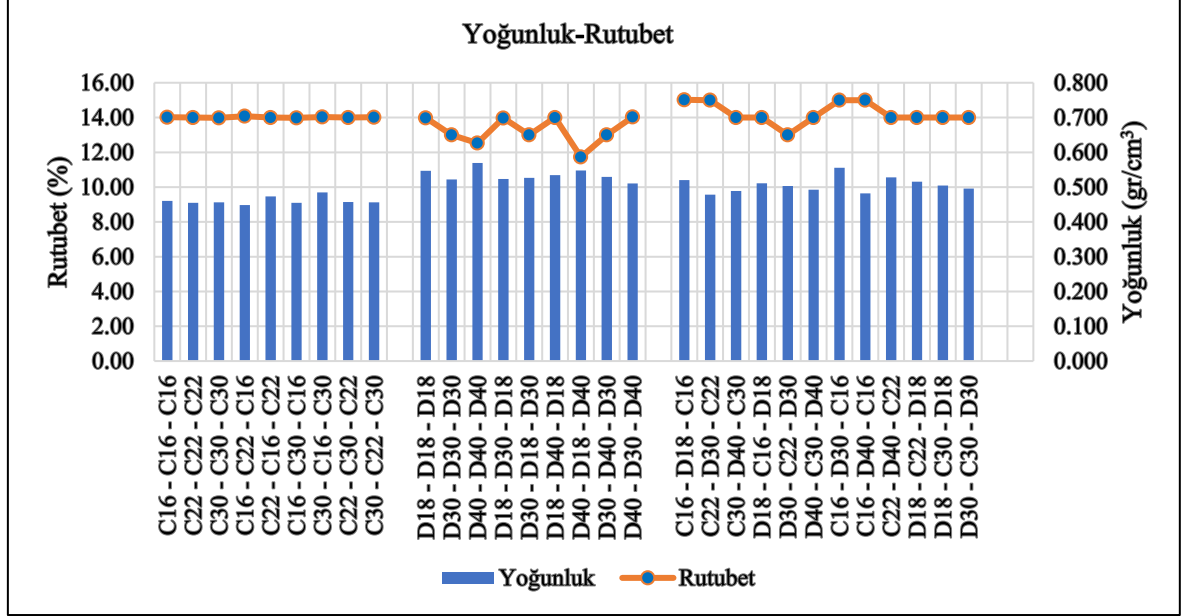
Llana vd. (2020), tarafından yapılan bir çalışmada kızılalğaç, dişbudak, huş ve çınar ağaçlarından elde edilen küçük boyutlu örnekler üzerine tahribatlı ve tahribatsız testler uygulanmıştır. Çalışmadan elde edilen  $R^2$  değerleri, elastikiyet modülü için 0,02-0,83, eğilme direnci için 0,03-0,81 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen tahmin modellerinin  $R^2$  değerleri literatürde belirtilen bu sınır değerleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Özellikle kızılalğaç kerestelerinden elde edilen  $R^2$  değerlerinin daha yüksek olduğu ve kurulan modellerin literatürdeki sonuçlara göre daha güvenilir olduğu görülmüştür.

Regresyon analizleri sonucunda elde edilen verilerle birlikte gerekli kalibrasyon ve düzeltmeler yapılarak TS EN 338 (2016) standardına göre tüm kerestelerin direnç sınıfları belirlenmiştir. Çalışmada belirtildiği gibi her bir ağaç türünden 3 farklı direnç sınıfları başarıyla oluşturulmuştur.

### 4.3. CLT Panellere Ait Tartışma

#### 4.3.1. CLT Panellerin Yoğunluk ve Rutubet Değerlerine Ait Tartışma

Üretilen CLT panellerin yoğunluk ve rutubet değerleri direnç sınıfı kombinasyonlarına göre Şekil 39’ da verilmiştir.



Şekil 39. Üretilen CLT panellerin yoğunluk ve rutubet değerleri değişimleri

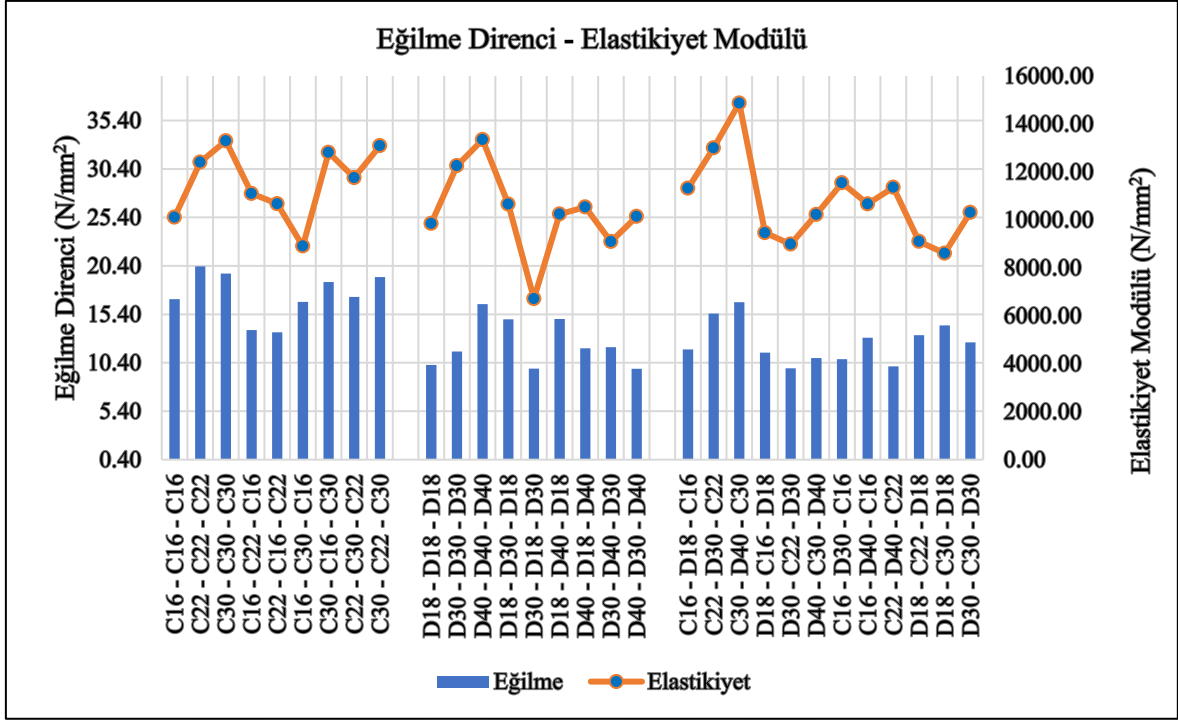
Üretilen CLT panellerin rutubet değerleri incelendiğinde, ladin panellerin değerleri arasında belirgin bir fark bulunamamışken, kızılğaç panellerde D40-D30-D40 grubunda, hibrit panellerde ise C16-D18-C16 grubunda en yüksek değerler bulunmuştur. Çalışma kapsamında temin edilen kerestelerin tahribatsız rutubet testleri yapılmış ve ladin kerestelerin kızılğaç kerestelerden daha rutubetli olduğu tespit edilmiştir. Bu kerestelerden üretilen CLT panellerde de benzer durumun gerçekleştiği görülmüştür. ANSI / APA PRG 320 (2019) standardına göre, CLT panellerde rutubet miktarının  $12 \pm 3$  aralığında olması gerekmektedir. Çalışmada CLT panellerin rutubet değerleri belirlenen bu sınır değerinin üzerinde bulunmuştur.

Üretilen CLT panellerin yoğunluk değerleri incelendiğinde, ladin panellerde C16-C30-C16 grubunda, kızılğaç panellerde D40-D40-D40 grubunda, hibrit panellerde ise C16-D30-C16 grubunda en yüksek değerler bulunmuştur. Literatürde, CLT panellerin yoğunluğunu, paneli oluşturan kerestelerin yoğunluğunun belirlediği ifade edilmiştir

(Callegari vd., 2010). Çalışmada, kızılğaç kerestelerden üretilen CLT paneller için de benzer bir durum söz konusudur. Yoğunluğu daha yüksek olan D40 kerestelerden üretilen D40-D40-D40 grubu CLT panellerin de yoğunluğu yüksek bulunmuştur. ANSI/APA PRG-320 (2019) standardına göre yoğunluğu  $0,350 \text{ g/cm}^3$ 'ten yüksek olan herhangi bir yumuşak ağaç türü CLT üretimi için uygun bir hammaddedir. Bu özellikle, sert ağaç türlerinin çoğu zaman yumuşak ağaç türlerinden daha yüksek bir yoğunluğa sahip olmasından dolayı, sert ağaç türleri için bir avantaj olabilir (Yusoh vd., 2021). Çalışmada üretilen CLT panellerin  $0,350 \text{ gr/cm}^3$ 'ten yüksek olduğu ve sert ağaç türlerinden biri olan kızılğacın ladin panellere göre daha yüksek yoğunluk değerleri verdiği belirlenmiştir. CLT panellerin yoğunluğunu ağaç türü, tabaka kalınlığı, yapıştırıcı türü ve miktarı, kerestelerin rutubet içeriği, kereste direnç sınıfları, pres parametreleri (basınç, sıcaklık, süre), lif yönü, panel boyutları ve yüzeyde kullanılan kaplama malzemeleri etkilemektedir (TS EN 16351, 2014; Sharifnia & Hindman, 2017). Ayrıca, Paridah vd. (2019) ahşap malzemelerin yoğunluğu ile anatomik özellikleri arasında yüksek bir korelasyon bulmuştur.

#### **4.3.2. CLT Panellerin Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülü Değerlerine Ait Tartışma**

Üretilen CLT panellerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri değişimleri Şekil 40' da verilmiştir.



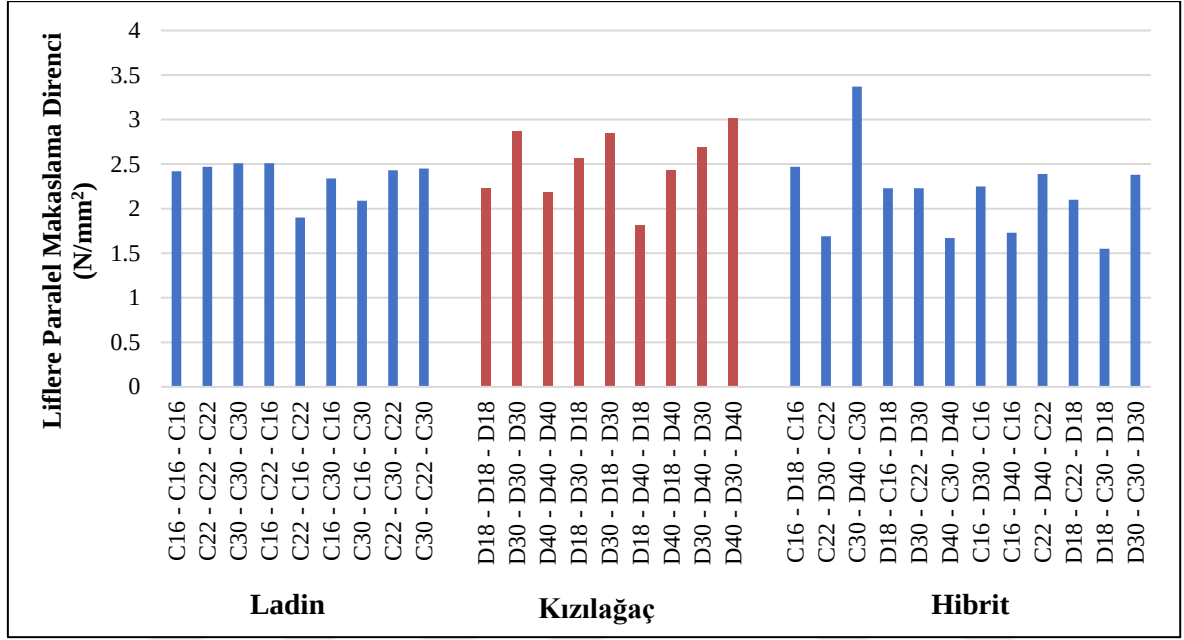
Şekil 40. Üretilen CLT panellerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri değişimleri

Üretilen CLT panellerin eğilme direnci değerleri incelendiğinde, ladin panellerde C22-C22-C22, kızılğaç panellerde D40-D40-D40 grubunda, hibrit panellerde ise C30-D40-C30 grubunda en yüksek değerler bulunmuştur. Ayrıca elastikiyet modülü değerleri incelendiğinde, ladin panellerde C30-C30-C30 ve C30-C22-C30, kızılğaç panellerde D40-D40-D40 grubunda, hibrit panellerde ise C30-D40-C30 grubunda en yüksek değerler bulunmuştur. Park vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, yumuşak ağaç ve sert ağaç olmak üzere toplam altı ağaç türünden üretilen CLT panellerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri üzerine yapmış oldukları çalışmada, ağaçların özgül ağırlık değerlerinin arttıkça eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca CLT üretiminde kullanılan kerestelerin hesaplanan elastikiyet modülü değerler ile CLT panellerin testlerinden elde edilen elastikiyet modülü değerleri arasında çok az fark olduğu belirtilmiştir. Çalışmada kızılğaç CLT panellerde literatürle benzer sonuçlar bulunmuştur. Hem D40-D40-D40 kızılğaç CLT panellerin yoğunluğu hem de D40 kızılğaç kerestelerin eğilme dirençleri ve elastikiyet modülleri diğer gruplardan yüksek bulunmuştur. CLT panellerin tüm tabakalarında aynı kalitede ahşap malzeme kullanılarak üretilmesi panellerin mekanik özellikleri üzerinde potansiyel olarak olumsuz bir etkiye neden olabilir. Örneğin, CLT panelin tüm tabakalarında yüksek direnç değerlerine sahip kerestelerin kullanılması

CLT panellerin genel gücünü ve sertliğini artırır. Ancak, bu durum eğilmeden kaynaklı meydana gelecek kırılmadan önce oluşan makaslama kırılmasının olasılığını arttırabilir ve sınıflandırma limit değerlerini sınırlandırabilir (Ettelaoui vd., 2022). Çalışmada ladin CLT panellerin C22-C22-C22 grubunun C30-C30-C30'a göre eğilme dirençlerinin yüksek olması literatürdeki bu bilgi ile açıklanabilir. Düşük yapısal kalitedeki kerestelerin CLT panellerin üretiminde kullanılması ile budak, lif kıvrıklığı ve öz varlığı gibi birçok doğal kusur CLT panel içerisinde bölgesel olarak mekanik özelliklerde değişkenliklere neden olabilir. Eğer bu değişiklikler CLT panelin belirli kısımlarında yoğunlaşırsa, panellerin homojenlik derecesinde ve dolayısıyla elastik özelliklerinde bir azalmaya neden olabilir (Gsell vd., 2007; Steiger vd., 2012). Benzer şekilde, çalışmada düşük direnç sınıflarındaki kerestelerle üretilen CLT panellerin elastikiyet modülü değerleri genellikle düşük bulunmuştur. Yoğunluk, anatomik özellikler, ıslanabilirlik ve yüzey pürüzlülüğü dahil olmak üzere ahşap malzemelerle ilgili faktörler, CLT paneller de dahil olmak üzere ahşap ve lamine ahşap ürünlerin fiziksel-mekanik davranışını ve mukavemet performansını etkileyen önemli özelliklerden bazılarıdır (Ortega Rodriguez & Tomazello-Filho 2019). Ayrıca, yapıştırıcı türleri, yapıştırıcı yayılma oranı ve sıkıştırma basıncı gibi CLT üretim faktörlerinin de mekanik özellikler üzerinde etkisinin yüksek olduğu bilinmektedir (Syahirah vd., 2025). CLT panellerin mekanik davranışlarının katmanlar arasındaki kerestelerin lif yönündeki ortogonalite ve kerestenin doğal anizotropisi nedeniyle karmaşık olduğu ve elde edilen direnç değerlerinin farklılık gösterebileceği ifade edilmiştir (Christovasilis vd., 2016). Gil-Moreno vd. (2022), tarafından yapılan bir çalışmada İngiliz ladin kerestelerinden üretilmiş CLT panellerin yapısal boyutlu eğilme direnci değerleri belirlenmiş ve 18-30,8 N/mm<sup>2</sup> arasında bulunmuştur. Aynı çalışmada elastikiyet modülü değerleri ise 6740 N/mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. He vd. (2020), tarafından yapılan başka bir çalışmada da Kara ladin üretilmiş üç tabakalı CLT panellerin eğilme direnci değerini 30,91 N/mm<sup>2</sup>, elastikiyet modülü değerini 4024 N/mm<sup>2</sup> olarak hesaplamıştır. Literatürden elde edilen bu değerler ile bu çalışmadan elde edilen eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca bu çalışmada üretilen ladin CLT panellerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri, ANSI/APA PRG 320 (2019) 'de belirtilen E1 kalite sınıfının sınır değerini karşılamaktadır. E1 kalite sınıfı ilgili standartta verilen tüm sınıfların en yükseğidir.

### 4.3.3. CLT Panellerin Liflere Paralel Makaslama Direnci Değerlerine Ait Tartışma

Üretilen CLT panellerin liflere paralel makaslama direnci değerleri değişimleri Şekil 41’ de verilmiştir.



Şekil 41. Üretilen CLT panellerin liflere paralel makaslama direnci değerleri değişimleri

Üretilen CLT panellerin liflere paralel makaslama direnci değerleri verilerine göre, en yüksek direnç değerleri ladin için C30-C30-C30, kızılağaç için D40- D30- D40 ve hibrit için C30-D40-C30 tabaka kombinasyonunda üretilen panellerden elde edilmiştir. Literatürde yapılan birçok araştırma, CLT panellerin liflere paralel makaslama direnci üzerine ağaç türü ve yoğunluğunun, yıllık halkaların yönünün, kerestelerin en boy oranının ve budakların varlığının etkili olduğunu belirtmiştir (Kumar vd., 2022). Yapılan araştırmalar liflere paralel makaslama direnci değerlerinin türler arasında değişebileceğini göstermiştir ve sert ağaçların yumuşak ağaçlarla karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek liflere paralel makaslama direnci değerlerine sahip olduğunu bildirmiştir (Görlacher, 2002; Aicher vd., 2016a; Kumar vd., 2023). Benzer şekilde, çalışmada kızılağaç CLT panellerin liflere paralel makaslama dirençleri genellikle ladin CLT panellerden yüksek bulunmuştur. Yoğunluk, rutubet içeriği, anatomik yapı, porözlülük, ahşap yüzeyinin tamponlama kapasitesi, yüzey kalitesi ve sıkıştırma basıncı, yapıştırıcı türleri, yayılma hızı ve kürlenme sıcaklığı gibi işlem parametreleri ahşabın yapışma özelliklerini etkileyen çeşitli faktörlerdendir (Yusoh vd.,

2021). CLT üretiminde yaygın olarak kullanılan ağaç türlerinden üretilen çoğu CLT panelin liflere paralel makaslama direnci değerlerinin birçok çalışmada, yapılan testler ile 1,0–2,0 N/mm<sup>2</sup> aralığında olduğu doğrulanmıştır (Zhou vd., 2014; Fink vd., 2018; Cao vd., 2019; Navaratnam vd., 2020; Huang vd., 2022). He vd. (2020), tarafından yapılan başka bir çalışmada da Kara ladinden üretilmiş üç tabakalı CLT panellerin liflere paralel makaslama direnci değerini 1,74 N/mm<sup>2</sup> olarak hesaplamıştır. Literatürden elde edilen bu değerler ile bu çalışmadan elde edilen liflere paralel makaslama direnci değerlerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca Sıtkı ladini üzerine yapılan liflere paralel makaslama direnci testleri sonucunda 1,03-1,71 N/mm<sup>2</sup> arasında değerler elde edildiği tespit edilmiştir (Sikora vd., 2016). Çalışmada CLT panellerin liflere paralel makaslama direnci değerleri literatürde verilen bu bilgilere paralellik gösterdiği tespit edilmiştir.

#### 4.3.4. CLT Panellere Ait Regresyon Modelleri

Üretilen CLT paneller üzerine yapılan tahribatlı ve tahribatsız testler ile elde edilen verilerin aralarındaki ilişkiyi ortaya koymak için regresyon analizi yapılmış ve tahribatlı ile tahribatsız test sonuçlarının birbiriyle yüksek oranda uyumlu olduğu belirlenmiştir. Tahribatlı testlerle belirlenen elastikiyet modülü değerleri ve akustik test cihazı (Sylvatest 4) ile tahribatsız belirlenen elastikiyet modülü değerleri arasındaki ilişki regresyon analizi ile ortaya konulmuştur. Ayrıca tahribatlı testlerle elde edilen eğilme direnci ve yoğunluk değerleri ile tahribatsız belirlenen vida tutma/çekme direnci değerleri arasında ilişki regresyon analizi ile belirlenmiştir. Çalışma kapsamında CLT paneller için elde edilen tüm regresyon modelleri belirleme katsayıları ( $R^2$ ) ile birlikte Tablo 84’te verilmiştir.

Concu vd. (2016) akustik test yönteminin CLT panellerin bazı mekanik özellikleri hakkında bilgi verme güvenilirliğini panellerin ahşap türü (Sardunya Deniz Çamı ve Ladin), tabaka sayısı (3 ve 5) ve tabaka kalınlığı (6, 10 ve 12 cm) ile ilişkilendirerek tartışmıştır. Çalışmada akustik ve mekanik parametreler (statik elastikiyet modülü ve eğilme direnci) arasındaki regresyon analizi başarıyla yapılmış ve  $R^2$  0,58 olarak hesaplanmıştır. Bu tahmin derecesinin, bazı yapısal ahşap türleri için literatürde rapor edilen tahmin dereceleriyle uyumlu olduğu ifade edilmiştir (Hanhijärvi & Ranta-Maunus, 2008; Diebold vd., 2000). Tablo 84’te CLT panellerden elde edilen hasarlı ve hasarsız test verilerin regresyon analizlerine bakıldığında ise hasarsız vida tutma/çekme direnci ile hasarlı eğilme direnci değerleri arasında hesaplanan belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0,7989-0,9997 arasında değişiklik

göstermektedir. Ayrıca CLT panellerde hasarsız elastikiyet modülü ile hasarlı elastikiyet modülü değerleri arasında hesaplanan belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0,7629-0,9980 arasında bulunmuştur. Çalışmada regresyon analizlerinden elde edilen  $R^2$  değerleri literatürde ifade edilen değerden oldukça yüksektir. Bundan dolayı kurulan regresyon modellerinin tahmin yeteneği güvenilirdir.

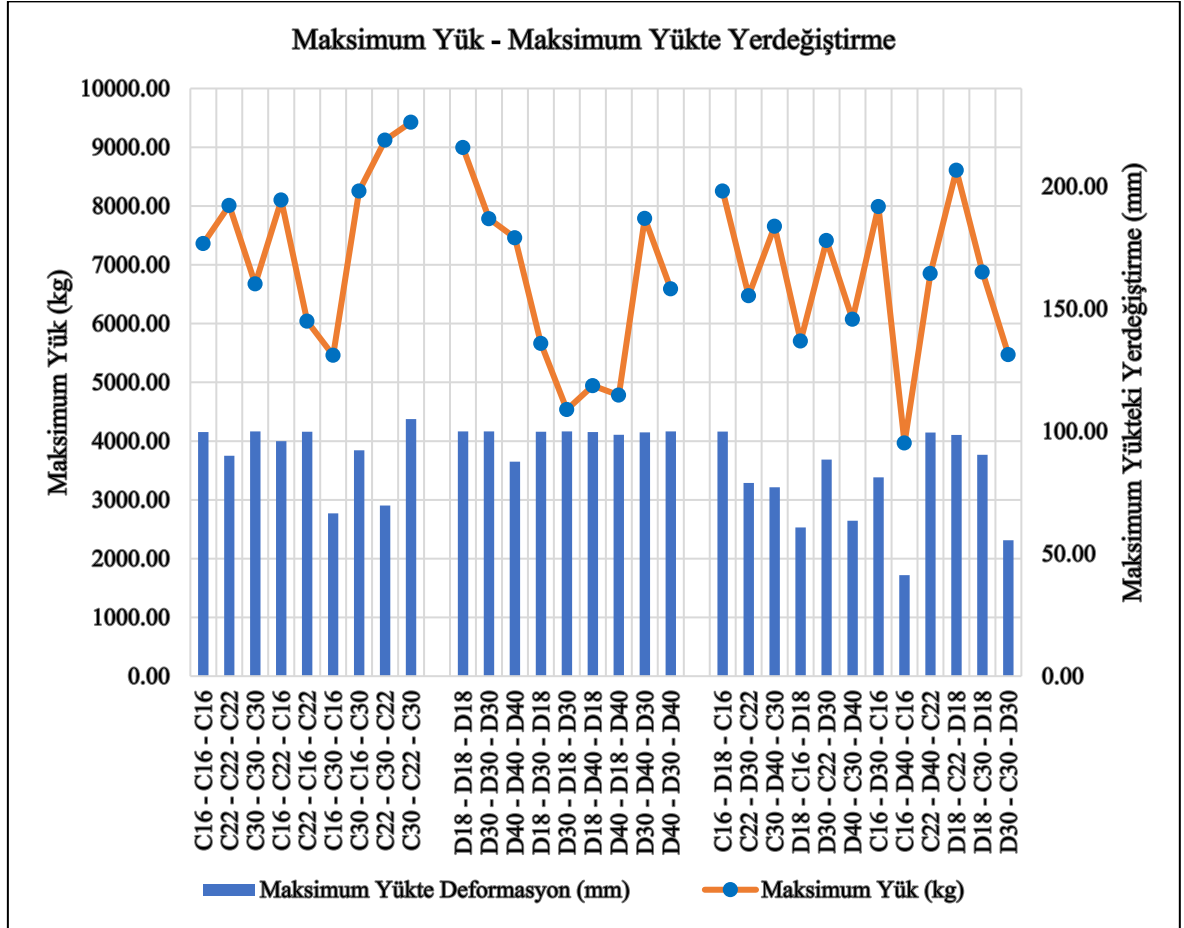


Tablo 84. CLT panellerin Tahribatsız ve Tahribatlı testlerine ilişkin belirleme katsayı ( $R^2$ ) değerleri ve regresyon modelleri

| Grup No | Ağaç Türü | Tabaka Kombinasyonu | Tahribatlı Elastikiyet Modülü (y) - Tahribatsız Elastikiyet Modülü (x) |                    | Tahribatlı Eğilme Direnci (y) - Tahribatsız Vida Tutma/Çekme Direnci (x) |                    | Tahribatlı Yoğunluk (y) - Tahribatsız Vida Tutma/Çekme Direnci (x) |                    |
|---------|-----------|---------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------|
|         |           |                     | $R^2$                                                                  | Denklem            | $R^2$                                                                    | Denklem            | $R^2$                                                              | Denklem            |
| 1       | Ladin     | C16 - C16 - C16     | 0,9787                                                                 | $y=2,4463x-7098$   | 0,9694                                                                   | $y=5,8628x-33093$  | 0,9279                                                             | $y=0,1103x+0,1569$ |
| 2       |           | C22 - C22 - C22     | 0,8927                                                                 | $y=0,4555x+8525,8$ | 0,8714                                                                   | $y=1,4578x+1687$   | 0,9875                                                             | $y=0,0068x+0,2928$ |
| 3       |           | C30 - C30 - C30     | 0,9980                                                                 | $y=4,558x-31590$   | 0,977                                                                    | $y=5,2285x+8,3159$ | 0,9661                                                             | $y=0,0576x+0,3321$ |
| 4       |           | C16 - C22 - C16     | 0,9862                                                                 | $y=3,2448x-11585$  | 0,7989                                                                   | $y=4,3814x-23,41$  | 0,9038                                                             | $y=0,0452x+0,3492$ |
| 5       |           | C22 - C16 - C22     | 0,7629                                                                 | $y=2,4812x-10844$  | 0,9975                                                                   | $y=61,73x-128,47$  | 0,9104                                                             | $y=0,1222x+0,1923$ |
| 6       |           | C16 - C30 - C16     | 0,8469                                                                 | $y=3,2039x-15677$  | 0,8467                                                                   | $y=13,146x-15,531$ | 0,7973                                                             | $y=0,0516x+0,3284$ |
| 7       |           | C30 - C16 - C30     | 0,9917                                                                 | $y=4,8858x+65278$  | 0,9975                                                                   | $y=23,556x-40,958$ | 0,9166                                                             | $y=0,0744x+0,2961$ |
| 8       |           | C22 - C30 - C22     | 0,9961                                                                 | $y=2,706x-11720$   | 0,8391                                                                   | $y=7,081x-1,2749$  | 0,8427                                                             | $y=0,1302x+0,1176$ |
| 9       |           | C30 - C22 - C30     | 0,8194                                                                 | $y=1,7556x-3541,7$ | 0,9938                                                                   | $y=28,774x-53,975$ | 0,8912                                                             | $y=0,1126x+0,1666$ |
| 10      | Kızılağaç | D18 - D18 - D18     | 0,8811                                                                 | $y=1,8553x-5673,6$ | 0,9532                                                                   | $y=2,9907x+0,2155$ | 0,9454                                                             | $y=0,0595x+0,3486$ |
| 11      |           | D30 - D30 - D30     | 0,9913                                                                 | $y=0,7386x+5398,4$ | 0,9779                                                                   | $y=3,1886x+1,5344$ | 0,8654                                                             | $y=0,0506x+0,3631$ |
| 12      |           | D40 - D40 - D40     | 0,9576                                                                 | $y=3,6371x-25930$  | 0,9605                                                                   | $y=18,26x-48,851$  | 0,8782                                                             | $y=0,0567x+0,3666$ |
| 13      |           | D18 - D30 - D18     | 0,9968                                                                 | $y=2,9555x-11122$  | 0,8893                                                                   | $y=8,552x-13,455$  | 0,8894                                                             | $y=0,0655x+0,3065$ |
| 14      |           | D30 - D18 - D30     | 0,9807                                                                 | $y=2,9421x-34802$  | 0,7516                                                                   | $y=16,166x-63,12$  | 0,9072                                                             | $y=0,0489x+0,3656$ |
| 15      |           | D18 - D40 - D18     | 0,7076                                                                 | $y=1,3037x-2421,2$ | 0,8046                                                                   | $y=8,3899x-8,9191$ | 0,8032                                                             | $y=0,0236x+0,4675$ |
| 16      |           | D40 - D18 - D40     | 0,7508                                                                 | $y=1,5695x-5950,5$ | 0,6135                                                                   | $y=8,6241x-16,693$ | 0,8487                                                             | $y=0,0892x+0,2522$ |
| 17      |           | D30 - D40 - D30     | 0,8209                                                                 | $y=3,00994x-36852$ | 0,9510                                                                   | $y=26,627x+101,17$ | 0,9529                                                             | $y=0,2348x-0,2566$ |
| 18      |           | D40 - D30 - D40     | 0,7585                                                                 | $y=17,483x-177766$ | 0,8270                                                                   | $y=29,481x-101,9$  | 0,9519                                                             | $y=0,0771x-0,7515$ |
| 19      | Hibrit    | C16 - D18 - C16     | 0,9997                                                                 | $y=2,1565x-7519,6$ | 0,7471                                                                   | $y=2,0458x-17,992$ | 0,9787                                                             | $y=0,1362x+0,1057$ |
| 20      |           | C22 - D30 - C22     | 0,9976                                                                 | $y=0,1205x+11920$  | 0,7921                                                                   | $y=73,881x-208,72$ | 0,8655                                                             | $y=0,2182x-0,1835$ |
| 21      |           | C30 - D40 - C30     | 0,9138                                                                 | $y=1,4492x+78,336$ | 0,9997                                                                   | $y=6,8981x-5,198$  | 0,9528                                                             | $y=0,1452x+0,0291$ |
| 22      |           | D18 - C16 - D18     | 0,8684                                                                 | $y=4,7194x-45238$  | 0,7987                                                                   | $y=1,294x-15,596$  | 0,9475                                                             | $y=0,055x+0,3345$  |
| 23      |           | D30 - C22 - D30     | 0,7821                                                                 | $y=4,2196x-26736$  | 0,8213                                                                   | $y=12,882x-27,227$ | 0,9657                                                             | $y=0,076x+0,2843$  |
| 24      |           | D40 - C30 - D40     | 0,7549                                                                 | $y=17,407x-153779$ | 0,9822                                                                   | $y=86,521x-243,44$ | 0,8881                                                             | $y=0,0454x+0,3592$ |
| 25      |           | C16 - D30 - C16     | 0,9913                                                                 | $y=3,9913x-23830$  | 0,9737                                                                   | $y=1,0049x+8,0798$ | 0,8565                                                             | $y=0,2147x-0,018$  |
| 26      |           | C16 - D40 - C16     | 0,8860                                                                 | $y=1,2136x-565,81$ | 0,8553                                                                   | $y=6,1527x-5,2664$ | 0,8346                                                             | $y=0,0754x+0,2586$ |
| 27      |           | C22 - D40 - C22     | 0,872                                                                  | $y=2,835x-35875$   | 0,8922                                                                   | $y=8,4759x-36,344$ | 0,9774                                                             | $y=0,1353x+0,108$  |
| 28      |           | D18 - C22 - D18     | 0,7391                                                                 | $y=0,8215x+2643,3$ | 0,9994                                                                   | $y=32,32x-91,502$  | 0,9443                                                             | $y=0,053x+0,3437$  |
| 29      |           | D18 - C30 - D18     | 0,9738                                                                 | $y=0,3416x-11264$  | 0,8923                                                                   | $y=12,302x-48,484$ | 0,8003                                                             | $y=0,0614x+0,3337$ |
| 30      |           | D30 - C30 - D30     | 0,7884                                                                 | $y=1,89x-5486,2$   | 0,9051                                                                   | $y=9,6652x-14,632$ | 0,9346                                                             | $y=0,1473x+0,0821$ |

#### 4.4. CLT Duvarlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylere Ait Tartışma

CLT duvarlara yapılan perde duvar analizi sonucunda maksimum yük ve maksimum yükte deformasyon değerleri değişimleri Şekil 42’ da verilmiştir.



Şekil 42. CLT duvarların maksimum yük ve maksimum yükte deformasyon değerleri değişimleri

Şekil incelendiğinde CLT panellerden üretilen perde duvarlarda en yüksek maksimum yük değerleri, ladin duvarlarında C30-C22-C30 kızılağaç duvarlarda D18-D18-D18 ve hibrit duvarlarda D18-C22-D18 gruplarından elde edilmiştir. Ladin CLT duvarlarda maksimum yük değerleri en yüksek olan grupların eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri de yüksek bulunmuştur. Bundan dolayı mekanik özellikleri iyi olan CLT panellerin kullanıldığı perde duvarlarında yapısal özelliklerinin iyi olacağı düşünülmektedir. Buna paralel olarak literatürde, perde duvarların yanal yük direnci genel olarak rijitlik, eğilme direnci, kopma

direnci ve süneklik olmak üzere 4 faktörden etkilendiği belirtilmiştir (Birinci vd., 2020). Ayrıca en yüksek maksimum yükteki deformasyon değerleri, ladin duvarlarında C30-C22-C30 kızılğaç duvarlarda D30-D18-D30 ve hibrit duvarlarda C16-D18-C16 gruplarından elde edilmiştir. Literatürde sert ağaç türlerinden poliüretan tutkalı kullanılarak üretilen CLT panellerin diğer tutkal türleri ile karşılaştırıldığında (fenol resorsinol ve melamin) daha düşük performans değerlerine sahip olduğu bulunmuştur (Brunetti vd., 2020; Yusoh vd., 2021). Musah vd., (2021) yapmış oldukları çalışmada sert ağaçlardan elde edilen CLT panellerde fenol resorsinol ve melamin bazlı yapıştırıcıları incelemiş ve çok umut verici sonuçlar elde etmişlerdir. Espinoza ve Buehlmann (2018) sert ağaçlardan CLT panel üretiminde, yumuşak ağaçlardan farklı olarak özel yapıştırıcıların geliştirilmesi ve daha yüksek kapasiteli preslerin kullanılması gerektiğini ifade etmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında poliüretan tutkalı ile kızılğaçtan üretilen CLT panellerin ladininden üretilen CLT panellere göre daha düşük yanal yük direnci göstermesi beklenebilir. Literatürde, CLT perde duvarların yanal yük dirençlerine ilişkin birçok çalışma mevcuttur (Ceccotti vd., 2010; Schneider vd., 2012; Pei vd., 2013a, b; Shen vd., 2013; Flatscher vd., 2015; Gavric vd., 2015; Li & Lam 2015; Tomasi & Smith, 2015; Popovski & Gavric 2016; Casagrande vd., 2016; Reynolds vd., 2017; Polastri & Casagrande, 2022; Dungani vd., 2023). Ancak bu çalışmalarda kullanılan test metotları (monoton ve döngüsel) ve standartları birbirinden farklıdır. Çalışmada kullanılan test metodu monotondur. Bu yüzden literatürdeki bu test metodundaki çalışmalar irdelenmiştir. Polastri ve Casagrande (2022) çamdan üretilmiş CLT panelleri kayın LVL malzemeyle birbirine bağlayarak elde ettiği perde duvarın yanal yük direncini incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda, duvarın maksimum yükünü 10300 kg bulmuştur. Çalışmada elde edilen en yüksek maksimum yük değeri 9425 kg'dır. Literatürdeki çalışmada kullanılan ağaç türünün ve panellerin birbiriyle olan bağlantısında kullanılan malzemenin farklı olmasına rağmen sonuçlar yakın bulunmuştur. Dungani vd. (2023) akasyadan ürettikleri CLT panelleri kullandığı perde duvarın yanal yük performansını belirlemiş ve duvarın maksimum yükteki deformasyon değerini 106,58 mm olarak tespit etmiştir. Benzer şekilde, çalışmada ise gruplar arasında en yüksek deformasyon değeri 104,96 mm olarak hesaplanmıştır.

CLT duvarlara yapılan yanal yük direnç testleri sonucunda maksimum yük, maksimum yükte deformasyon, son yük, son yükte deformasyon ve rijitlik değerleri değişimleri Tablo 85' de verilmiştir.

Tablo 85. CLT duvarlarda perde duvar analiz değerleri

| Grup No | Ağaç Türü | Tabaka Kombinasyonu | Maksimum Yük (kg) | Maksimum Yükte Deformasyon (mm) | Son Yük (kg) | Son Yükteki Yer Değiştirme (mm) | Rijitlik (kN/mm) |
|---------|-----------|---------------------|-------------------|---------------------------------|--------------|---------------------------------|------------------|
| 1       | Ladin     | C16 - C16 - C16     | 7362,078          | 99,697                          | 5889,66      | 133,17                          | 1,32             |
| 2       |           | C22 - C22 - C22     | 8009,755          | 90,015                          | 6407,80      | 129,43                          | 1,79             |
| 3       |           | C30 - C30 - C30     | 6674,177          | 99,9460                         | 5339,34      | 154,33                          | 1,40             |
| 4       |           | C16 - C22 - C16     | 8100,934          | 95,964                          | 6480,75      | 130,87                          | 1,71             |
| 5       |           | C22 - C16 - C22     | 6039,584          | 99,855                          | 4831,67      | 139,42                          | 1,24             |
| 6       |           | C16 - C30 - C16     | 5458,958          | 66,499                          | 4367,17      | 85,32                           | 1,34             |
| 7       |           | C30 - C16 - C30     | 8254,578          | 92,267                          | 6603,66      | 120,59                          | <b>2,08</b>      |
| 8       |           | C22 - C30 - C22     | 9121,281          | 69,715                          | 7297,02      | 86,36                           | 1,54             |
| 9       |           | C30 - C22 - C30     | 9425,671          | 104,96                          | 7540,54      | 134,53                          | 1,23             |
| 10      |           | D18 - D18 - D18     | 8994,621          | 99,964                          | 7195,70      | 125,07                          | <b>1,84</b>      |
| 11      | Kızılağaç | D30 - D30 - D30     | 7783,775          | 99,97                           | 6227,02      | 134,14                          | 1,44             |
| 12      |           | D40 - D40 - D40     | 7459,300          | 87,63                           | 5967,44      | 110,38                          | 1,36             |
| 13      |           | D18 - D30 - D18     | 5662,273          | 99,802                          | 4529,82      | 163,69                          | 1,06             |
| 14      |           | D30 - D18 - D30     | 4535,790          | 99,987                          | 3628,63      | 122,51                          | 1,77             |
| 15      |           | D18 - D40 - D18     | 4942,467          | 99,717                          | 3953,97      | 169,26                          | 1,48             |
| 16      |           | D40 - D18 - D40     | 4780,670          | 98,575                          | 3824,54      | 158,62                          | 1,42             |
| 17      |           | D30 - D40 - D30     | 7788,956          | 99,558                          | 6231,16      | 123,23                          | 1,28             |
| 18      |           | D40 - D30 - D40     | 6591,444          | 99,975                          | 5273,16      | 126,68                          | <b>1,84</b>      |
| 19      | Hibrit    | C16 - D18 - C16     | 8254,443          | 99,871                          | 6603,55      | 131,76                          | 1,73             |
| 20      |           | C22 - D30 - C22     | 6473,847          | 78,88                           | 5179,08      | 119,39                          | 1,83             |
| 21      |           | C30 - D40 - C30     | 7653,790          | 77,139                          | 6123,03      | 111,02                          | 1,27             |
| 22      |           | D18 - C16 - D18     | 5702,610          | 60,734                          | 4562,09      | 93,43                           | 2,05             |
| 23      |           | D30 - C22 - D30     | 7413,04           | 88,47                           | 5930,43      | 125,90                          | 2,02             |
| 24      |           | D40 - C30 - D40     | 6072,025          | 63,493                          | 4857,62      | 84,45                           | 1,39             |
| 25      |           | C16 - D30 - C16     | 7989,83           | 81,218                          | 6391,86      | 110,13                          | 2,04             |
| 26      |           | C16 - D40 - C16     | 3966,934          | 41,229                          | 3173,55      | 55,01                           | 1,77             |
| 27      |           | C22 - D40 - C22     | 6852,13           | 99,5                            | 5481,70      | 153,50                          | 1,92             |
| 28      |           | D18 - C22 - D18     | 8609,40           | 98,505                          | 6887,52      | 139,85                          | 1,83             |
| 29      |           | D18 - C30 - D18     | 6876,16           | 90,402                          | 5500,93      | 120,84                          | 1,55             |
| 30      |           | D30 - C30 - D30     | 5471,54           | 55,487                          | 4377,23      | 79,30                           | <b>2,58</b>      |

Tablo incelendiğinde, CLT perde duvarların en yüksek rijitlik değerleri ladin duvarlar için C30-C16-C30, kızılğaç duvarlar için D18-D18-D18 ve D40-D30-D40, hibrit duvarlar için ise D30-C30-D30 gruplarından elde edilmiştir. Tüm grupların rijitlik değerleri 1,06 – 2,58 kN/mm arasında değişmiştir. Literatürde farklı yapısal ahşap malzemeler üzerine yapılan perde duvar analizleri sonucunda elde edilen rijitlik değerleri irdelenmiştir. Xiao vd. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, perde duvarların kaplanması 9 mm kalınlığında bambu kontrplaklar kullanılmıştır. 2,44x2,44 m boyutlarındaki bu levhalar, 6d çivilerle sabitlenmiş ve levha kenarlarında 150 mm, levha ortasında ise 300 mm aralıklarla bağlantı elemanları yerleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre, bu perde duvarların rijitlik değerleri 0,89 ile 1,09 kN/mm arasında değişmiştir (Xiao vd., 2015). FEMA'nın 2001 yılında yayımladığı raporda ise, 9,5 mm kalınlığındaki kontrplakla kaplanan ve 8d çivilerle, kenarlarda 150 mm,

ortada ise 300 mm mesafe bırakılarak yapılan perde duvarların rijitlik değeri 1,3 kN/mm olarak hesaplanmıştır (FEMA, 2001). Ayrıca, Zhu vd. (2010) tarafından yapılan bir başka çalışmada, perde duvarların kaplanması kullanılan OSB levhaların rijitlik değeri 1,67 kN/mm olarak tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında analizleri yapılan perde duvarlar ve bağlantı elemanlarında meydana gelen hasarlar ve şekil değiştirmelerine ait görseller Şekil 43’ de verilmiştir.



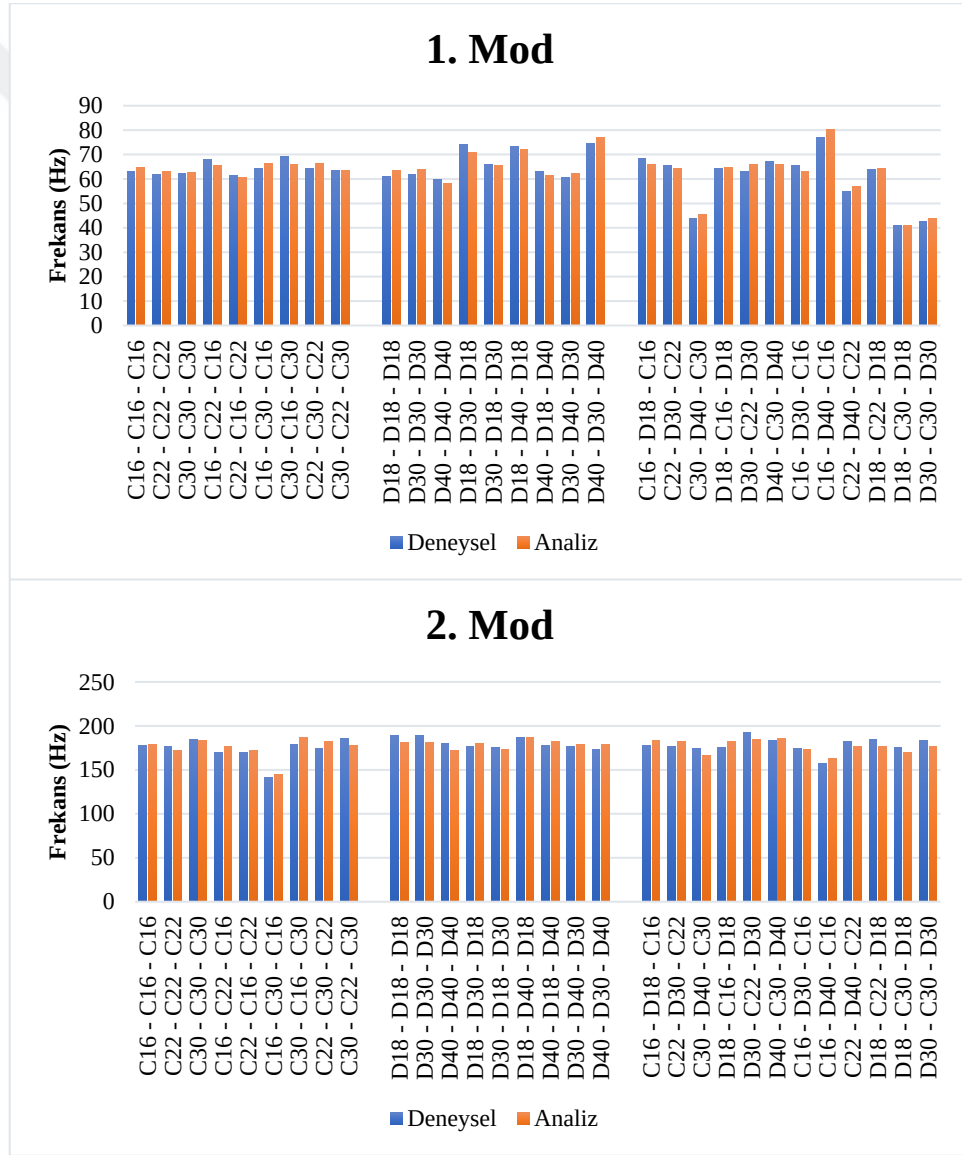
Şekil 43. Yanal yük testine maruz kalan CLT duvarların tüm gruplarında en sık rastlanan hasarlar

Yanal yük testine maruz kalan CLT duvarların tüm gruplarında en sık rastlanan hasarlar panel-panel ve zemin-duvar bağlantı noktalarında meydana gelmiştir. Bağlantı elemanlarının CLT duvarla birleştirilmesinde kullanılan (çivi/vida) malzemeler de hasar almıştır. Ayrıca CLT duvarların test esnasında düzlem dışı hareketlerde tüm gruplarda gözlemlenmiştir. Nadir olarak bazı panellerde ise test esnasında delaminasyonlar meydana gelmiştir. CLT panellerin yapısal olarak kullanılabilmesi durumunda boyut sınırlamaları olduğu için genellikle istenen açıklığa ulaşmak adına bağlantılara ihtiyaç duyulmaktadır (Muster & Frangi, 2020). Yapısal bir ahşap malzemenin bağlantı elemanları genellikle tüm

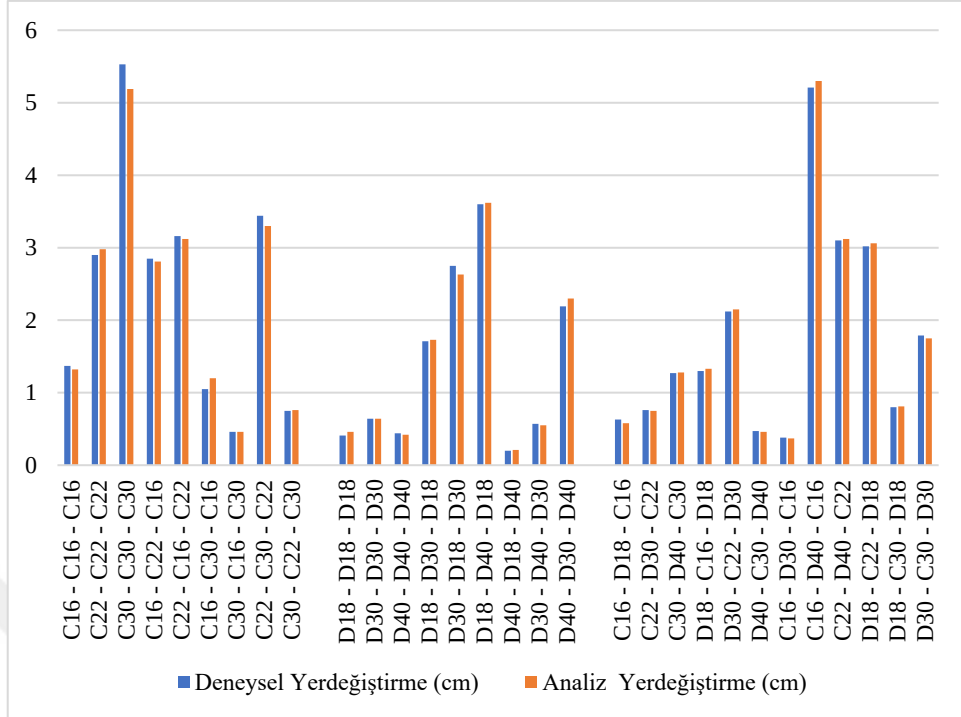
malzemenin en zayıf kısmı olarak bilinmektedir. CLT paneller zemin elemanları, çatı düzenekleri veya düzlem dışı bükülmeye neden olan yüklere maruz kalan herhangi bir başka eleman olarak kullanıldığında bağlantı elemanları önemli bir bükülme momentine maruz kalmaktadır (Subhani vd., 2022).

#### 4.5. SAP 2000 Analizlerine Ait Tartışma

Çalışma kapsamında 30 adet CLT duvara uygulanan deneysel ve sonlu eleman analizlerine ait grafikler aşağıda verilmiştir.



Şekil 44. CLT duvara uygulanan frekans değerlerine ait deneysel ve sonlu eleman analizler arası ilişki



Şekil 45. CLT duvara uygulanan yer değiştirmeye ait deneysel ve sonlu eleman analizler arası ilişki

Çalışma kapsamında elde edilen deneysel rijitlikler ile sonlu eleman modelleri ile elde edilen rijitlikler değerlendirilmiştir. Rijitliklerin elde edilmesinde maksimum yük ve maksimum yüke ait elde edilen rölatif yer değiştirmeler arasındaki mesafeler lineer kabulü ile rijitlik değerleri hesaplanmış ve ilgili değerler Tablo 86’da verilmiştir.

Tablo 86. Sonlu eleman modelleri ile elde edilen rijitlik

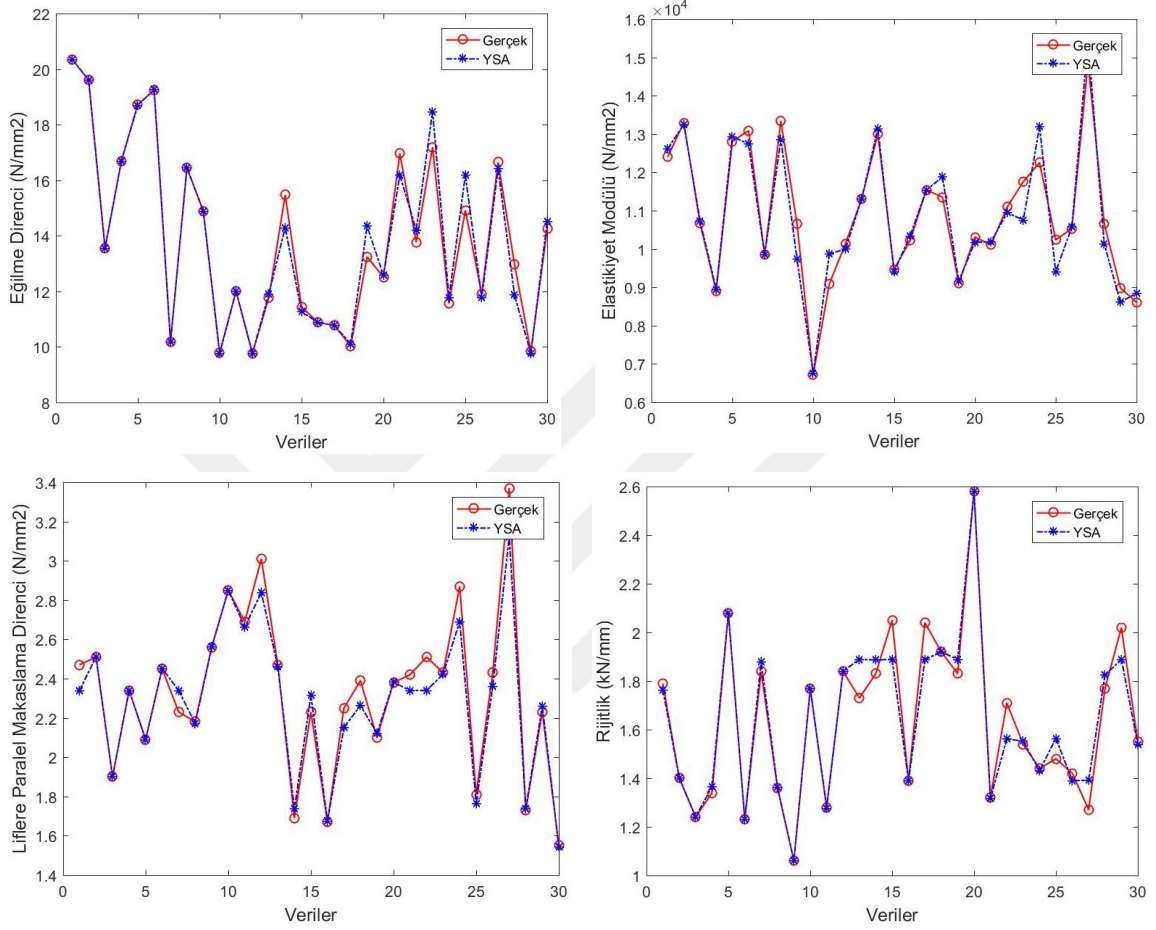
| Grup No | Ağaç Türü | Tabaka Kombinasyonu | Maksimum Yük (kN) | Rölatif Yerdeğiştirme (m) | Rijitlik (kN/m) |
|---------|-----------|---------------------|-------------------|---------------------------|-----------------|
| 1       | Ladin     | C16 - C16 - C16     | 72,2              | 0,0428                    | 1686,916        |
| 2       |           | C22 - C22 - C22     | 78,54             | 0,022                     | 3570            |
| 3       |           | C30 - C30 - C30     | 65,45             | 0,0399                    | 1640,351        |
| 4       |           | C16 - C22 - C16     | 79,43             | 0,0141                    | 5633,333        |
| 5       |           | C22 - C16 - C22     | 59,22             | 0,0232                    | 2552,586        |
| 6       |           | C16 - C30 - C16     | 53,52             | 0,011                     | 4865,455        |
| 7       |           | C30 - C16 - C30     | 80,94             | 0,0096                    | <b>8431,25</b>  |
| 8       |           | C22 - C30 - C22     | 89,45             | 0,029                     | 3084,483        |
| 9       |           | C30 - C22 - C30     | 92,43             | 0,0207                    | 4465,217        |
| 10      | Kızılağaç | D18 - D18 - D18     | 88,2              | 0,0022                    | 40090,91        |
| 11      |           | D30 - D30 - D30     | 76,33             | 0,0192                    | 3975,521        |
| 12      |           | D40 - D40 - D40     | 73,15             | 0,0091                    | <b>8038,462</b> |
| 13      |           | D18 - D30 - D18     | 56,62             | 0,0135                    | 4194,074        |
| 14      |           | D30 - D18 - D30     | 44,47             | 0,0206                    | 2158,738        |
| 15      |           | D18 - D40 - D18     | 48,46             | 0,0285                    | 1700,351        |
| 16      |           | D40 - D18 - D40     | 46,88             | 0,0061                    | 7685,246        |
| 17      |           | D30 - D40 - D30     | 76,37             | 0,0176                    | 4339,205        |
| 18      |           | D40 - D30 - D40     | 64,64             | 0,00805                   | 8029,814        |
| 19      | Hibrit    | C16 - D18 - C16     | 80,94             | 0,0162                    | 4996,296        |
| 20      |           | C22 - D30 - C22     | 63,48             | 0,01                      | 6348            |
| 21      |           | C30 - D40 - C30     | 75,05             | 0,0116                    | 6469,828        |
| 22      |           | D18 - C16 - D18     | 55,92             | 0,0098                    | 5706,122        |
| 23      |           | D30 - C22 - D30     | 72,7              | 0,0159                    | 4572,327        |
| 24      |           | D40 - C30 - D40     | 59,55             | 0,0131                    | 4545,802        |
| 25      |           | C16 - D30 - C16     | 78,35             | 0,0071                    | 11035,21        |
| 26      |           | C16 - D40 - C16     | 38,89             | 0,007                     | 5555,714        |
| 27      |           | C22 - D40 - C22     | 67,2              | 0,0225                    | 2986,667        |
| 28      |           | D18 - C22 - D18     | 84,43             | 0,023                     | 3670,87         |
| 29      |           | D18 - C30 - D18     | 67,43             | 0,0104                    | 6483,654        |
| 30      |           | D30 - C30 - D30     | 53,65             | 0,0045                    | <b>11922,22</b> |

Tablo 86’da görüldüğü gibi SAP2000 programı ile elde edilen sonuçlardan en yüksek rijitlik Ladin duvarlarında C30-C16-C30, Kızılağaç duvarlarında D40-D40-D40 ve Hibrit duvarlarında D30-C30-D30 grubundan elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar deneysel verilerle paralellik göstermektedir. Bu durum sonlu eleman modelinde dikkate alınan parametrelerin deneysel ile birlikte uyum içerisinde olduğu ve aynı zamanda gelecek çalışmalarda deneysel ölçümlere ihtiyaç duyulmadan benzer parametreler ile birlikte sonlu eleman model analizlerin gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.

Yapılan deneysel çalışmalar ile SAP 2000 programında yapılan sonlu eleman modelleri ve analiz sonuçları birbirleriyle uyumlu olarak elde edilmiştir.

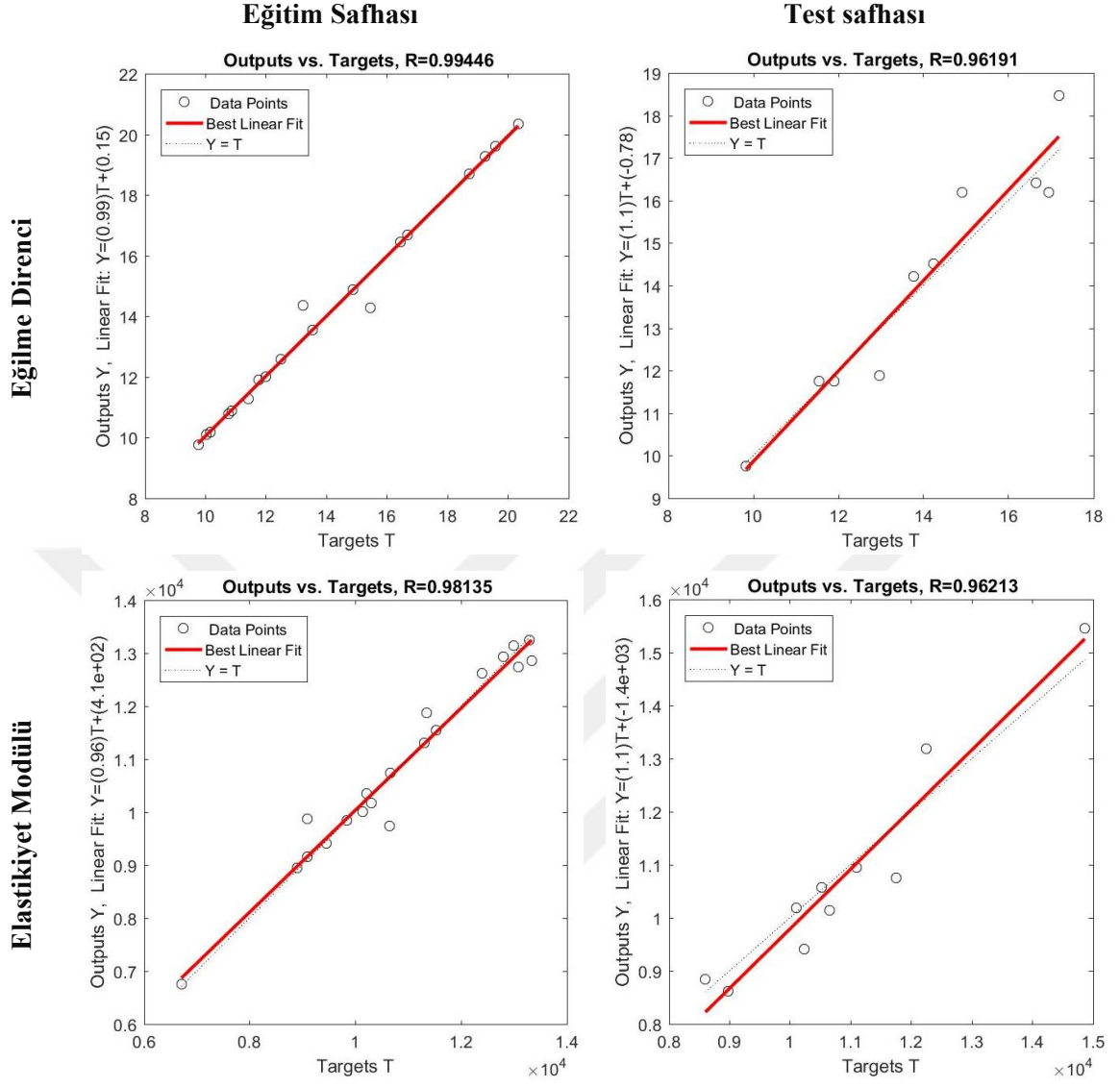
#### 4.6. Yapay Sinir Ağları Analizlerine Ait Tartışma

Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ile YSA modellerinden elde edilen tahmin verilerin karşılaştırmaları çıktı değişkenlerine göre Şekil 46'da verilmiştir.

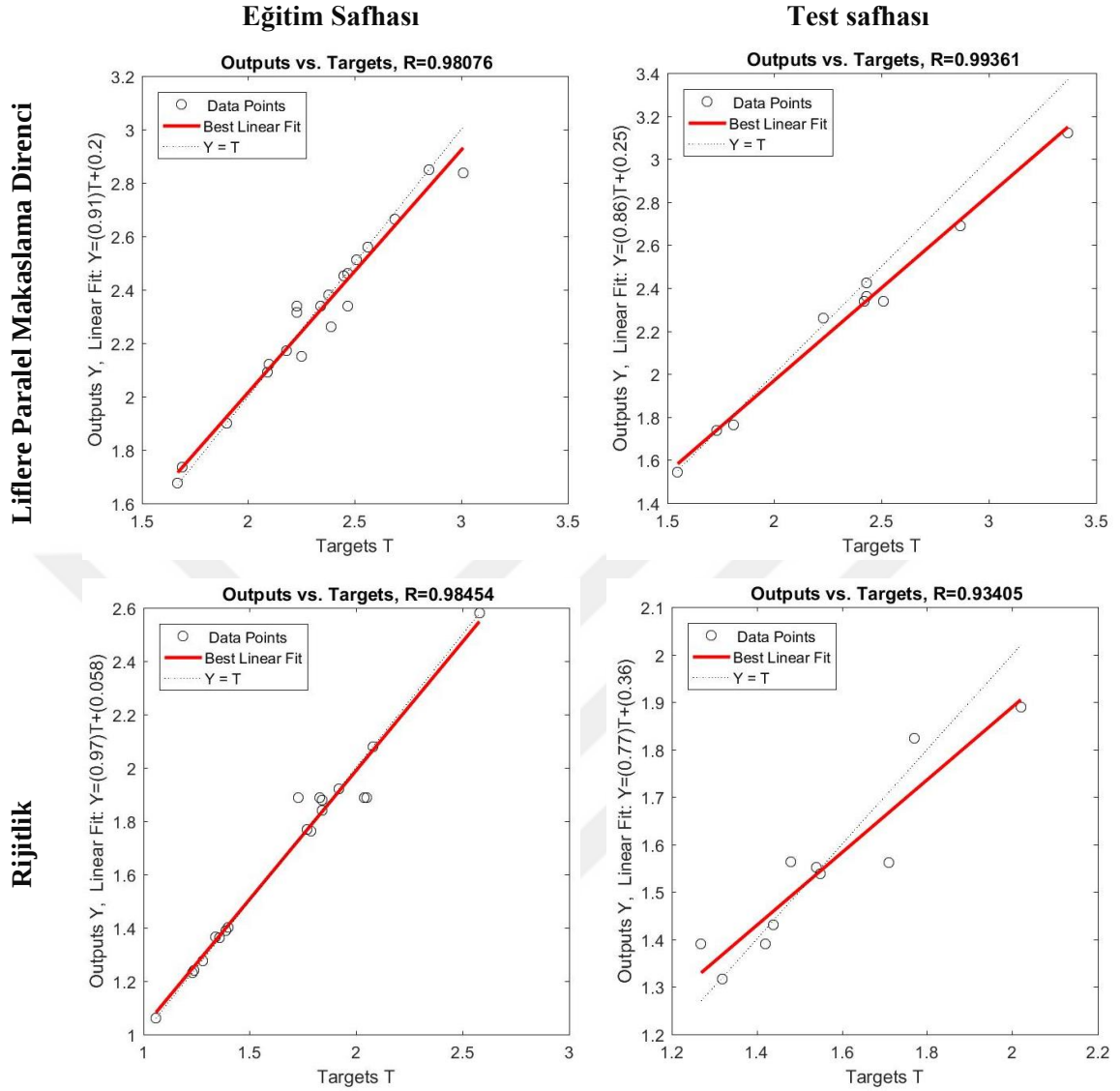


Şekil 46. Gerçek veriler ile tahmin verilerinin karşılaştırılması

Şekiller incelendiğinde, deneysel verilerin tahmin verileriyle büyük ölçüde uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, deneysel veriler ile tahmin verileri arasındaki ilişkiyle hesaplanabilen regresyon analizleri, tahmin modellerinin geçerliliğini ve doğruluğunu belirlemek için kullanılabilen en önemli parametrelerden biridir. Korelasyon katsayıları 1'e yaklaşması modellerin tahmin doğruluğu arttığını belirtmektedir (Özşahin, 2012). Analizler sonucunda, tahmin modelleri için hesaplanan korelasyon katsayıları ( $R^2$ ) ve regresyon grafikleri Şekil 47 ve 48'te çıktı değişkenine göre verilmiştir.



Şekil 47. Eğilme direnci ve elastikiyet modülü tahmin modellerine ait regresyon grafikleri



Şekil 48. Liflere paralel makaslama direnci ve rijitlik tahmin modellerine ait regresyon grafikleri

Şekiller incelendiğinde, eğilme direnci tahmin modelinin R değeri, eğitim safhasında 0,99446 iken test safhasında 0,96191 olarak hesaplanmıştır. Elastikiyet modülü tahmin modelinde ise R değeri, eğitim safhasında 0,98135 iken test safhasında 0,96213 olarak hesaplanmıştır. Liflere paralel makaslama direnci tahmin modelinde R değeri, eğitim safhasında 0,98076 iken test safhasında 0,99361 olarak hesaplanmıştır. Rijitlik tahmin modelinde ise R değeri, eğitim safhasında 0,98454 iken test safhasında 0,93405 olarak hesaplanmıştır. R değerleri dikkate alındığında, korelasyon katsayıları 1'e yakın olan bu modellerin, deneysel veriler ile tahmin verilerinin arasındaki uyumun çok iyi olduğu

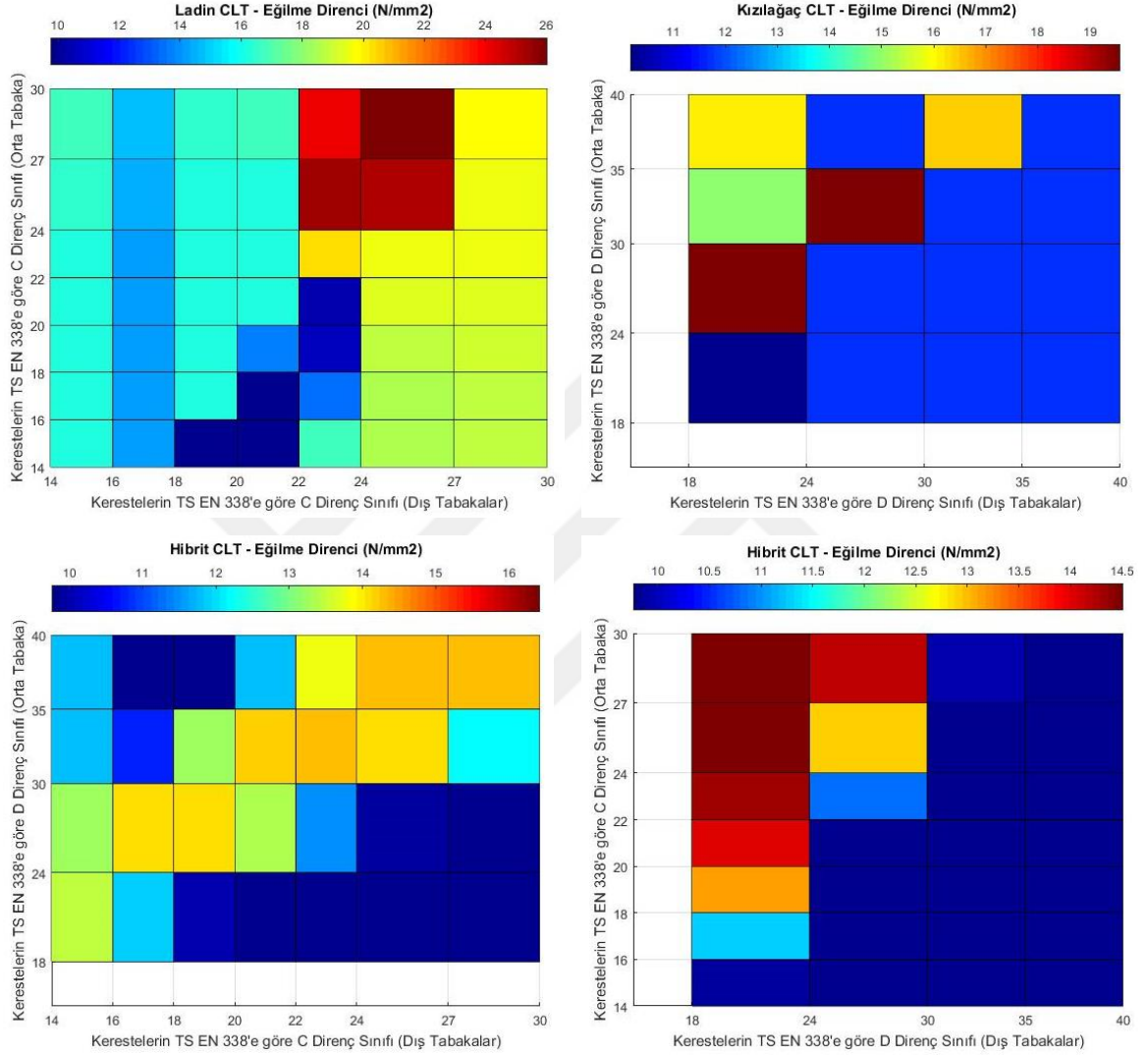
istatistiksel olarak da kanıtlanmıştır. İstatistiksel olarak kanıtlanan tahmin modellerinin güvenilirliği ve tahmin kabiliyetlerinin kesinliği artmıştır.

Tablo 78 ve 79’da verilen tahmin modellerine ait MAPE ve RMSE değerleri ayrıca bu uyumun ne kadar yüksek olduğunu kanıtlamıştır. Özellikle MAPE, en önemli değerlendirme kriterlerinden biridir ve birçok araştırmacı, MAPE’yi kullanarak model performansını değerlendirmiştir (Antanasijević vd. 2013, Tiryaki vd. 2016, Yadav & Nath, 2017). Literatürde MAPE değerinin % 10’un altında olması durumunda model performansının yüksek olduğu belirtilmiştir (Yadav & Nath, 2017). Bu çalışmada, eğilme direnci değerlerine ait MAPE değerleri, eğitim verileri için %1,04 ve test verileri için %3,90 olarak belirlenirken; elastikiyet modülü değerlerine ait MAPE değerleri, eğitim verileri için %1,95 ve test verileri için %4,26 olarak hesaplanmıştır (Tablo 78). Liflere paralel makaslama direnci değerlerine ait MAPE değerleri, eğitim verileri için %1,77 ve test verileri için %3,16 olarak hesaplanırken; rijitlik değerlerine ait MAPE değerleri ise eğitim verileri için %1,85 ve test verileri için %3,80 olarak tespit edilmiştir (Tablo 79). Bu hata seviyeleri, YSA tahmin modellerinin etkili bir şekilde tatmin edici sonuçlar verdiğini ve yeterli doğruluk ve güvenilirliğe sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca çalışma başarı ölçütlerinden biri olan MAPE değerinin %5’ten daha az olması ölçütü elde edilen bu sonuçlarla sağlanmıştır.

En iyi YSA modelinin belirlenmesinde MAPE değerlerinin yanı sıra RMSE değerleri de dikkate alınmaktadır (Küçükönder vd., 2016). Düşük RMSE değerleri, iyi model performansı gösteren parametrelerden biridir (Taşpınar & Bozkurt, 2014). Eğilme direnci eğitim ve test verileri için RMSE değerleri sırasıyla 0,37 ve 0,74 olarak hesaplanırken; elastikiyet modülü için bu değerler sırasıyla 333,62 ve 585,06 olarak belirlenmiştir (Tablo 78). Liflere paralel makaslama direnci eğitim ve test verileri için RMSE değerleri sırasıyla 0,07 ve 0,12 olarak hesaplanırken; rijitlik için bu değerler sırasıyla 0,06 ve 0,08 olarak belirlenmiştir (Tablo 79). Bu hata seviyeler, eğilme direnci, elastikiyet modülü, liflere paralel makaslama direnci ve rijitlik değerlerine ait tahmin modelleri için tatmin edici olduğunu kanıtlamıştır.

YSA analizleriyle elde edilen, yüksek performanslı bir tahmin modeli kullanılarak deneysel çalışmalarda kullanılmayan girdi değişkenlerinin ara verilerine karşılık gelen çıktı verilerinin tahmininde yüksek doğruluk oranlarına ulaşılabilmektedir (Varol vd. 2018). Girdi değişkeni olarak belirlenen TS EN 338 (2016)’e göre kereste direnç sınıfı değerlerinin (C16, C22, C30 ve D18, D30, D40) deneylerde kullanılmayan ara değerlerine (C14, C18, C20, C27 ve D24, D35) karşılık gelen eğilme direnci, elastikiyet modülü, liflere paralel

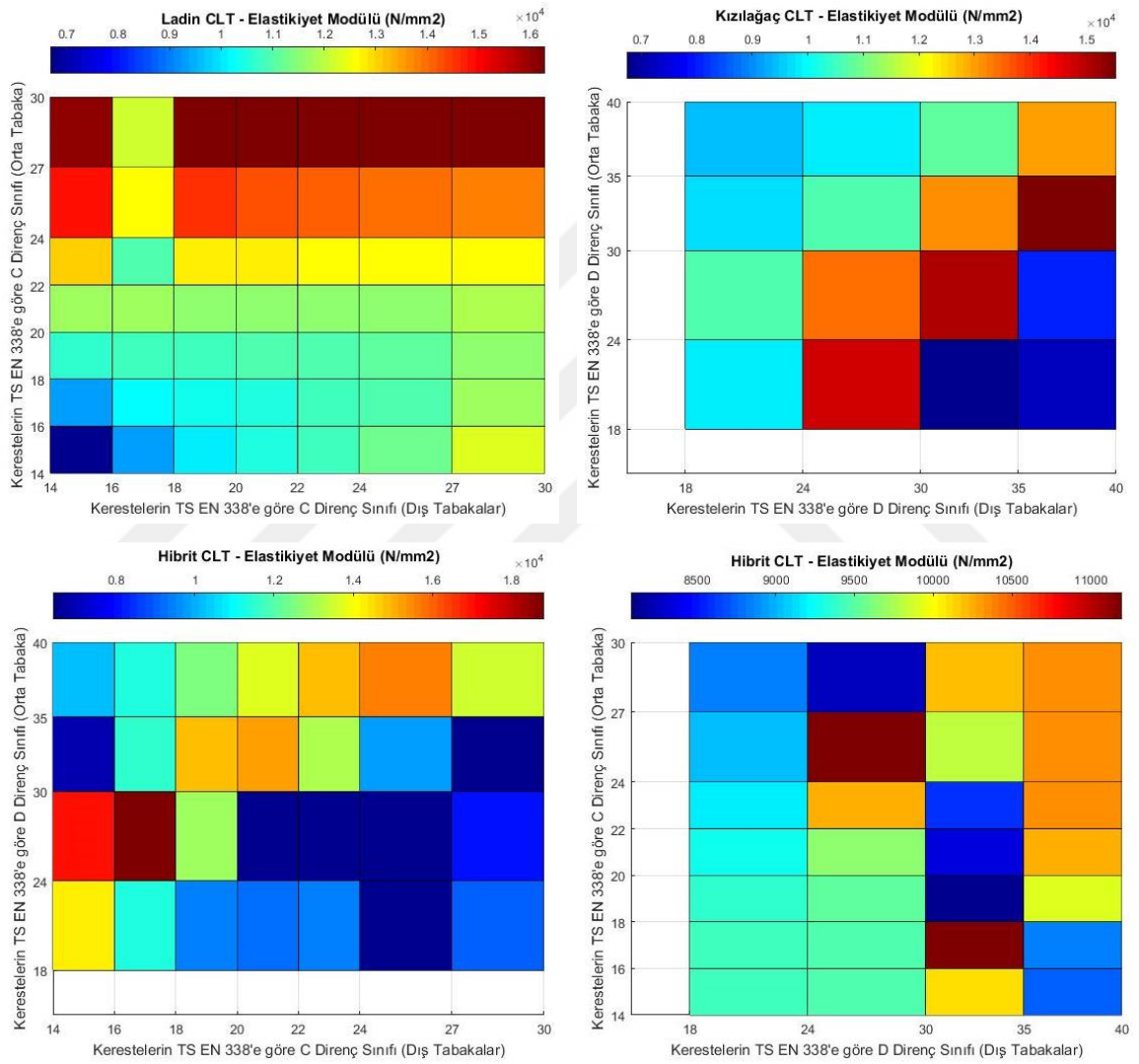
makaslama direnci ve rijitlik, ağaç türüne göre tahmin edilmiş ve bu değerlerin CLT panellerin dış ve orta tabakalarında kullanılan kereste direnç sınıfına göre değişimleri Şekil 49-52 arasında verilmiştir.



Şekil 49. Kereste direnç sınıfına göre CLT paneller için eğilme direnci değerlerinin değişimi

CLT panellerin eğilme direnci değişimleri incelendiğinde, ladinden üretilen panellerde dış tabakalarda kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının C24 ve C27; orta tabakada kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının ise C27 ve C30 olması durumunda panellerin eğilme dirençlerinin en yüksek değerlere ulaşacağı tahmin edilmiştir. Kızılağaçtan üretilen panellerde dış tabakalarda kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının D18; orta tabakada kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının ise D24 olması durumunda ve ayrıca dış

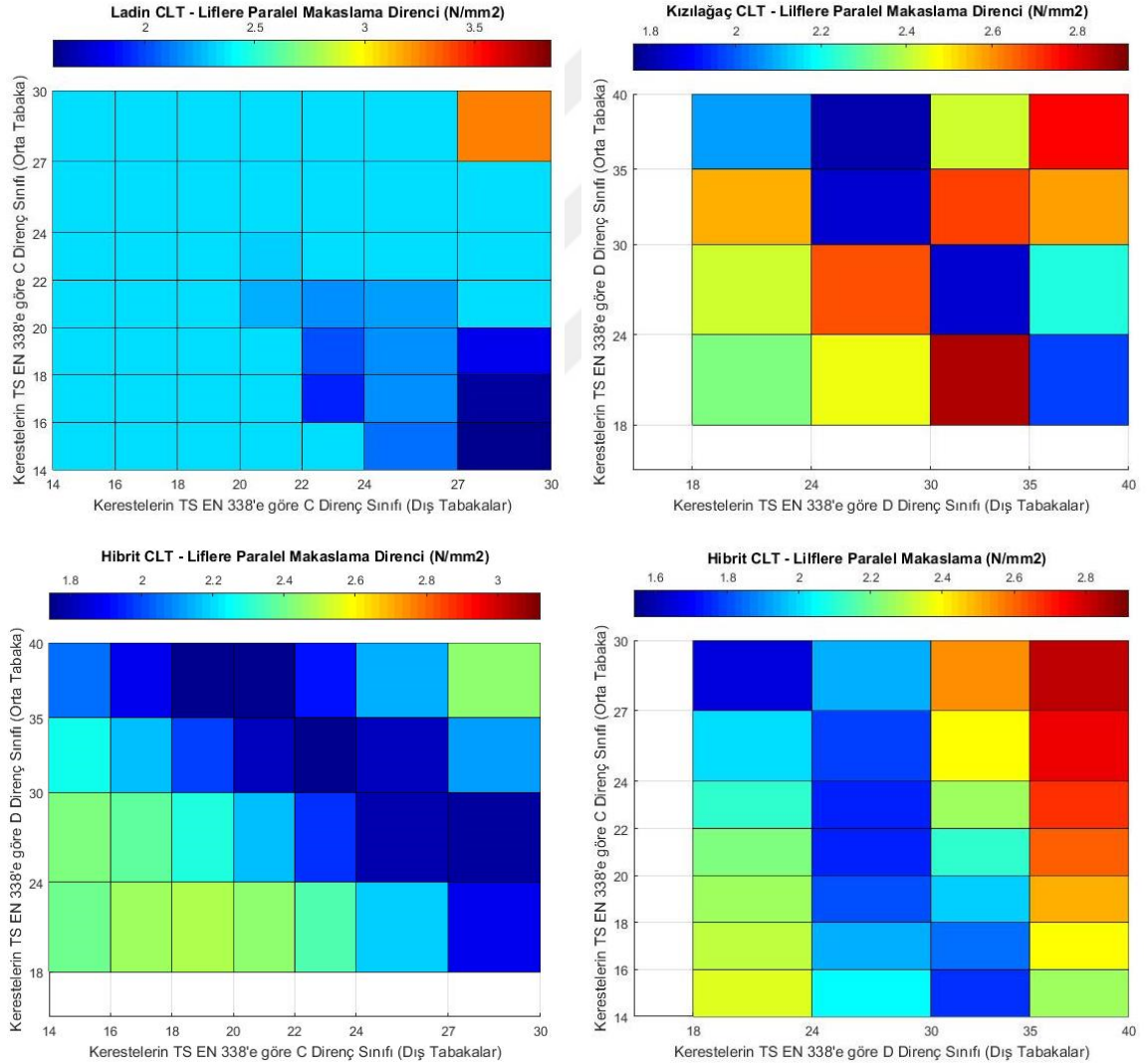
tabakalarda D24 orta tabakalarda D30 olması durumunda panellerin eğilme dirençlerinin en yüksek değerler vereceği tahmin edilmiştir. Hibrit CLT panellerde en yüksek eğilme direnci değerleri, dış tabakasında ladin, orta tabasında kızılğaç olan gruplarda sırasıyla C30-D40 direnç sınıfları kombinasyonunda bulunmuştur. Dış tabakası kızılğaç orta tabakası ladin olan hibrit panellerde ise en yüksek değerler, D18'in dış tabakalarda; C24, C27 ve C30'un orta tabakalarda kullanıldığı kombinasyonlardan elde edilmiştir.



Şekil 50. Kereste direnç sınıfına göre CLT paneller için elastikiyet modülü değerlerinin değişimi

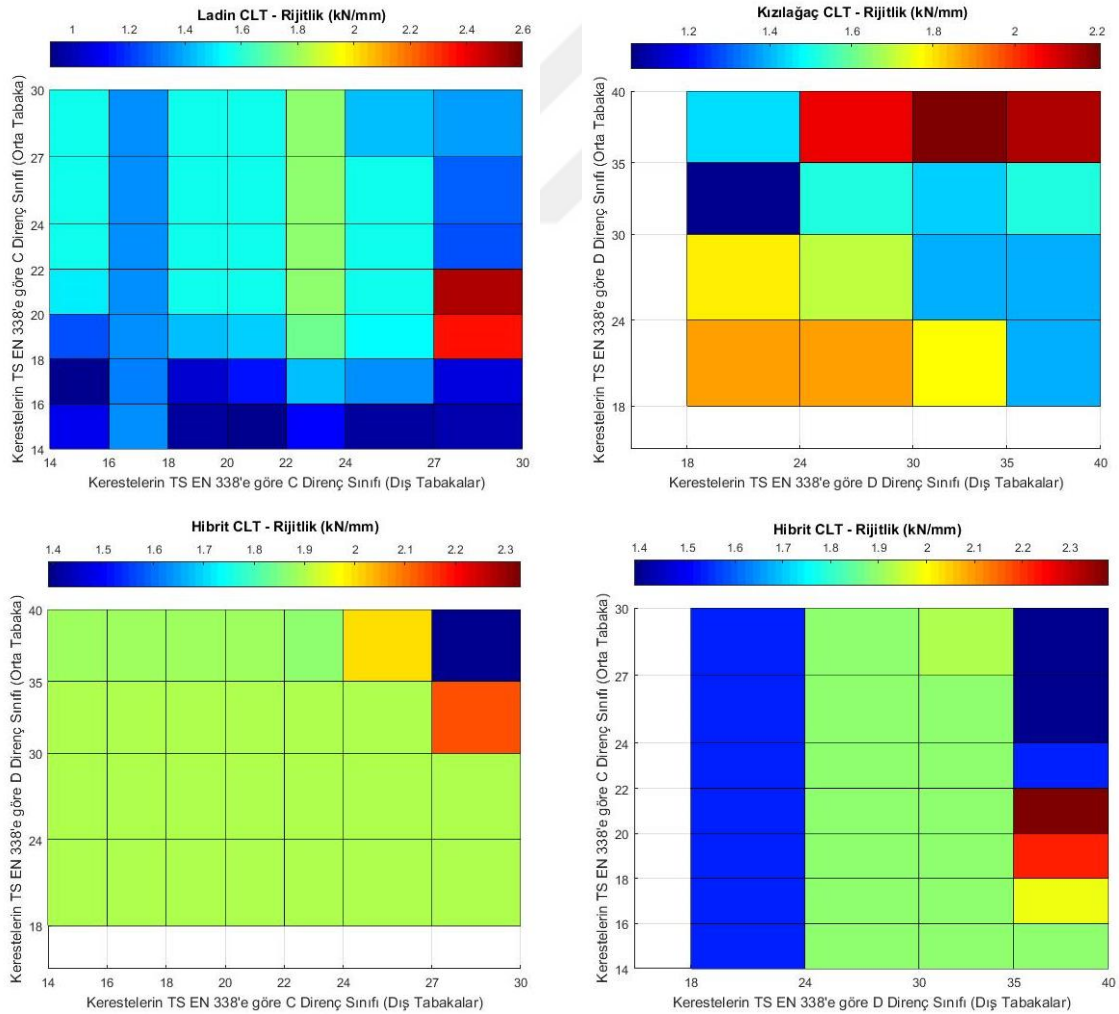
CLT panellerin elastikiyet modülü değişimleri incelendiğinde, ladinden üretilen panellerde dış tabakalarda kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının C18-C30 aralığında; orta tabakada kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının ise C27 ve C30 olması durumunda

panellerin elastikiyet modülünün en yüksek değerlere ulaşacağı tahmin edilmiştir. Kızılağaçtan üretilen panellerde dış tabakalarda kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının D40; orta tabakada kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının ise D35 olması durumunda ve ayrıca dış tabakalarda D35 orta tabakalarda D40 olması durumunda panellerin elastikiyet modülünün en yüksek değerler vereceği tahmin edilmiştir. Hibrit CLT panellerde en yüksek elastikiyet modülü değerleri, dış tabakasında ladin, orta tabasında kızılağaç olan gruplarda sırasıyla C16-D24 direnç sınıfları kombinasyonunda bulunmuştur. Dış tabakası kızılağaç orta tabakası ladin olan hibrit panellerde ise en yüksek değerler, D24 ve D30'un dış tabakalarda; C16 ve C24'ün orta tabakalarda kullanıldığı kombinasyonlardan elde edilmiştir.



Şekil 51. Kereste direnç sınıfına göre CLT paneller için liflere paralel makaslama direnci değerlerinin değişimi

CLT panellerin liflere paralel makaslama direnci değişimleri incelendiğinde, ladinden üretilen panellerde dış tabakalarda kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının C27 ve C30; orta tabakada kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının ise C27 ve C30 olması durumunda panellerin liflere paralel makaslama dirençlerini en yüksek değerlere ulaşacağı tahmin edilmiştir. Kızılāęaçtan üretilen panellerde dış tabakalarda kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının D35 ve D40; orta tabakada kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının ise D30, D35 ve D40 olması durumunda panellerin liflere paralel makaslama dirençlerinin en yüksek değerler vereceği tahmin edilmiştir. Hibrit CLT panellerde en yüksek liflere paralel makaslama direnci değerleri, dış tabakasında ladin, orta tabasında kızılāęaç olan gruplarda sırasıyla C30-D40 direnç sınıfları kombinasyonunda bulunmuştur. Dış tabakası kızılāęaç orta tabakası ladin olan hibrit panellerde ise en yüksek değerler, D40'ın dış tabakalarda; C24 ve C27'nin orta tabakalarda kullanıldığı kombinasyonlardan elde edilmiştir.



Şekil 52. Kereste direnç sınıfına göre CLT paneller için rijitlik değerlerinin değişimi

CLT panellerden üretilen perde duvarların rijitlik değişimleri incelendiğinde, ladin üretilen duvarlarda dış tabakalarda kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının C27 ve C30; orta tabakada kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının ise C18 ve C20 olması durumunda duvarların rijitliklerinin en yüksek değerlere ulaşacağı tahmin edilmiştir. Kızılağaçtan üretilen panellerde dış tabakalarda kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının D30 ve D35; orta tabakada kullanılan kerestelerin direnç sınıflarının ise D35 olması durumunda duvarların rijitliklerinin en yüksek değerler vereceği tahmin edilmiştir. Hibrit CLT panellerde en yüksek liflere paralel makaslama direnci değerleri, dış tabakasında ladin, orta tabasında kızılağaç olan gruplarda sırasıyla C30-D24 direnç sınıfları kombinasyonunda bulunmuştur. Dış tabakası kızılağaç orta tabakası ladin olan hibrit panellerde ise en yüksek değerler, D30 ve D35'in dış tabakalarda; C20 ve C30'un orta tabakalarda kullanıldığı kombinasyonlardan elde edilmiştir.

Analizler sonucunda elde edilen modellerin tahmin değerleri incelenerek ağaç türüne göre optimum kereste direnci sınıfları ve tabaka kombinasyonları tespit edilmiştir. Belirlenen optimum tabaka kombinasyonları ile bu kombinasyonlara karşılık gelen en yüksek yapısal direnç değerleri Tablo 87'de verilmiştir.

Tablo 87. CLT paneller için optimum kereste direnç sınıfı ve tabaka kombinasyonları

| Yapısal Direnç Özelliği                                | Ağaç Türü | Tabaka Kombinasyonu (Dış-Orta-Dış) | Tahmin Edilen En Yüksek Direnç Değeri |
|--------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Eğilme Direnci (N/mm <sup>2</sup> )                    | Ladin     | C24-C27-C24                        | 26,03                                 |
|                                                        | Kızılağaç | D18-D24-D18                        | 19,58                                 |
|                                                        | Hibrit    | C30-D40-C30                        | 16,42                                 |
|                                                        | Hibrit    | D18-C30-D18                        | 14,51                                 |
| Elastikiyet Modülü (N/mm <sup>2</sup> )                | Ladin     | C22-C27-C22                        | 16286,57                              |
|                                                        | Kızılağaç | D35-D30-D35                        | 15545,86                              |
|                                                        | Hibrit    | C16-D24-C16                        | 18820,98                              |
|                                                        | Hibrit    | D24-C24-D24                        | 11196,35                              |
| Liflere Paralel Makaslama Direnci (N/mm <sup>2</sup> ) | Ladin     | C27-C30-C27                        | 3,85                                  |
|                                                        | Kızılağaç | D40-D35-D40                        | 2,92                                  |
|                                                        | Hibrit    | C30-D40-C30                        | 3,12                                  |
|                                                        | Hibrit    | D40-C24-D40                        | 2,92                                  |
| Rijitlik (kN/mm)                                       | Ladin     | C30-C18-C30                        | 2,60                                  |
|                                                        | Kızılağaç | D30-D35-D30                        | 2,21                                  |
|                                                        | Hibrit    | C30-D24-C30                        | 2,33                                  |
|                                                        | Hibrit    | D30-C30-D30                        | 2,38                                  |

Tablodaki yapısal direnç değerleri incelendiğinde, ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin kızılağaç ve hibrit CLT panellere göre çok daha yüksek eğilme direnci ve liflere paralel makaslama direnci değerleri verdiği görülmüştür. Ancak, elastikiyet modülü ve

rijitlik değerlerinde hibrit panellerin daha iyi değerler verdiği belirlenmiştir. Dış tabakalarında ladin kerestelerin orta tabakalarında kıızılağaç kerestelerin kullanıldığı hibrit panellerin elastikiyet modülü diğer gruplara göre daha yüksek bulunmuştur. Dış tabakalarında kıızılağaç kerestelerin orta tabakalarında ladin kerestelerin kullanıldığı hibrit panellerden üretilen CLT perde duvarın yanal yük altındaki rijitlik performansı diğer gruplara göre daha iyi olduğu belirlenmiştir.

CLT paneller zerine YSA ile modelleme ve optimizasyon çalışmalarının sayısı literatürde oldukça sınırlı kalmıştır. Bobadilha vd. (2021) YSA modellemelerini CLT panellerin açık havada maruz kaldığı renk değişimlerinde kullanırken; Dong vd. (2017) CLT maliyetlerini ve enerji tüketimlerini YSA ile modellemiştir. Bu çalışmaların dışında özellikle CLT panellerin mekanik özellikleri ve rijitlikleri üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bundan dolayı bu çalışma, literatüre yeni bir bakış açısı ve kullanılabilir bir veri kaynağı sunmuştur.

## **5. SONUÇLAR**

### **5.1. CLT Üretiminde Kullanılan Kerestelere Ait Sonuçlar**

#### **5.1.1. Tahribatsız Rutubet Tayinine Ait Sonuçlar**

1. Çalışma kapsamından temin edilen ladin kerestelerin tüm görsel kalite sınıflarının rutubet değerleri, kızılğaç kerestelerin görsel kalite sınıflarının değerlerinden daha yüksek bulunmuştur

#### **5.1.2. Tahribatsız Vida Tutma/Çekme ve Makaslama Direncine Ait Sonuçlar**

1. Ladin kerestelerin C30 direnç sınıfı grubunun tahribatsız vida tutma/çekme direnci değerleri, diğer direnç sınıfı gruplarından istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
2. Kızılğaç kerestelerde ise direnç sınıfı grupları arasında istatistiksel olarak bir fark bulunamamıştır.
3. Ladin kerestelerin C30 direnç sınıfı grubunun tahribatsız makaslama direnci değerleri, diğer direnç sınıfı gruplarından istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
4. Kızılğaç kerestelerde ise direnç sınıfı grupları arasında istatistiksel olarak bir fark bulunamamıştır.

#### **5.1.3. Tahribatsız Yoğunluk, Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülü Ait Sonuçlar**

1. Ladin kerestelerin C22 ve C30 direnç sınıfı grubunun tahribatsız yoğunluk değerleri, C16 direnç sınıfı grubundan istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
2. Kızılğaç kerestelerde en yüksek yoğunluk değerleri istatistiksel olarak D30 ve D40 direnç sınıfı gruplarında bulunmuştur.

3. Ladin kerestelerin C30 direnç sınıfı grubunun tahribatsız eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri, diğer direnç sınıfı gruplarından istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
4. Kızılağaç kerestelerde en yüksek eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri istatistiksel olarak D40 direnç sınıfı grubunda bulunmuştur.

#### **5.1.4. Tahribatlı Yoğunluk ve Basınç Direncine Ait Sonuçlar**

1. Ladin kerestelerin C22 ve C30 direnç sınıfı gruplarının tahribatlı yoğunluk değerleri, C16 direnç sınıfı grubundan istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
2. Kızılağaç kerestelerde en yüksek yoğunluk değerleri istatistiksel olarak D30 ve D40 direnç sınıfı gruplarında bulunmuştur.
3. Ladin kerestelerin C22 ve C30 direnç sınıfı gruplarının tahribatlı basınç direnci değerleri, C16 direnç sınıfı grubundan istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
4. Kızılağaç kerestelerde en yüksek basınç direnci değerleri istatistiksel olarak D40 direnç sınıfı grubunda bulunmuştur.

#### **5.1.5. Tahribatlı Makaslama Direnci, Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Sonuçlar**

1. Ladin kerestelerin C30 direnç sınıfı grubunun tahribatlı makaslama direnci değerleri, diğer direnç sınıfı gruplarından istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
2. Kızılağaç kerestelerde en yüksek makaslama değerleri istatistiksel olarak D40 direnç sınıfı grubunda bulunmuştur.
3. Ladin kerestelerin C30 direnç sınıfı grubunun tahribatlı eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri, diğer direnç sınıfı gruplarından istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
4. Kızılağaç kerestelerde en yüksek eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri istatistiksel olarak D40 direnç sınıfı grubunda bulunmuştur.

## 5.2. CLT Panellere Ait Sonuçlar

### 5.2.1. Tahribatsız Rutubet ve Yoğunluk Testlerine Ait Sonuçlar

1. Ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin direnç sınıflarının kombinasyonlarıyla oluşturulan gruplara ait tahribatsız rutubet değerlerinde istatistiksel olarak fark bulunamamıştır.
2. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek rutubet değerleri istatistiksel olarak D18-D18-D18, D18-D30-D18, D18-D40-D18 ve D40-D30-D40 gruplarından elde edilmiştir.
3. Hibrit CLT panellerde ise, C16-D18-C16, C22-D30-C22, C16-D30-C16 ve C16-D40-C16 kombinasyon grupları istatistiksel olarak en yüksek rutubet değerlerini vermiştir.
4. Ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C30-C16-C30 grubunda tahribatsız yoğunluk değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
5. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek yoğunluk değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 grubundan elde edilmiştir.
6. Hibrit CLT panellerde ise, C16-D30-C16 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek yoğunluk değerini vermiştir.

### 5.2.2. Tahribatsız Vida Tutma/Çekme Direnci ve Makaslama Direncine Ait Sonuçlar

1. Ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C16-C16-C16 grubunda tahribatsız vida tutma/çekme direnci değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
2. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek vida tutma/çekme direnci değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 grubundan elde edilmiştir.
3. Hibrit CLT panellerde ise, C30-D40-C30, D18-C16-D18 ve D18-C22-D18 kombinasyon grupları istatistiksel olarak en yüksek vida tutma/çekme direnci değerlerini vermiştir.

4. Ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C16-C16-C16 grubunda tahribatsız makaslama direnci değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
5. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek makaslama direnci değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 grubundan elde edilmiştir.
6. Hibrit CLT panellerde ise, C30-D40-C30, D18-C16-D18 ve D18-C22-D18 kombinasyon grupları istatistiksel olarak en yüksek makaslama direnci değerlerini vermiştir.

### 5.2.3. Tahribatsız Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Sonuçlar

1. Ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C30-C30-C30 grubunda tahribatsız eğilme direnci değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
2. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek eğilme direnci değerleri istatistiksel olarak D30-D30-D30, D40-D40-D40, D30-D18-D30, D40-D18-D40, D30-D40-D30 ve D40-D30-D40 gruplarından elde edilmiştir.
3. Hibrit CLT panellerde ise, D30-C30-D30 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek eğilme direnci değerini vermiştir.
4. Ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C30-C16-C30 grubunda tahribatsız elastikiyet modülü değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
5. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek elastikiyet modülü değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 ve D40-D18-D40 gruplarından elde edilmiştir.
6. Hibrit CLT panellerde ise, C22-D40-C22 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek elastikiyet modülü değerlerini vermiştir.

### 5.2.4. Tahribatlı Yoğunluk ve Liflere Paralel Makaslama Direncine Ait Sonuçlar

1. Ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin direnç sınıflarının kombinasyonlarıyla oluşturulan gruplara ait tahribatlı yoğunluk değerlerinde istatistiksel olarak fark bulunamamıştır.

2. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek yoğunluk değerleri istatistiksel olarak D18-D18-D18, D40-D40-D40 ve D40-D18-D40 gruplarından elde edilmiştir.
3. Hibrit CLT panellerde ise, C16-D30-C16 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek yoğunluk değerini vermiştir.
4. Ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C22-C16-C22 grubu dışındaki diğer tüm gruplarında tahribatlı liflere paralel makaslama direnci değerleri, istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
5. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek liflere paralel makaslama direnci değerleri istatistiksel olarak D40-D30-D40 grubundan elde edilmiştir.
6. Hibrit CLT panellerde ise, C16-D18-C16, C22-D40-C22 ve D30-C30-D30 kombinasyon grupları istatistiksel olarak en yüksek liflere paralel makaslama direnci değerlerini vermiştir.

#### 5.2.5. Tahribatlı Eğilme Direnci ve Elastikiyet Modülüne Ait Sonuçlar

1. Ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C22-C22-C22 grubunda tahribatlı eğilme direnci değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
2. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek eğilme direnci değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 grubundan elde edilmiştir.
3. Hibrit CLT panellerde ise, C30-D40-C30 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek eğilme direnci değerini vermiştir.
4. Ladin kerestelerden üretilen CLT panellerin C30-C30-C30 ve C30-C22-C30 gruplarında tahribatlı elastikiyet modülü değerleri, diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur.
5. Kızılağaç kerestelerden üretilen CLT panellerde en yüksek elastikiyet modülü değerleri istatistiksel olarak D40-D40-D40 grubundan elde edilmiştir.
6. Hibrit CLT panellerde ise, C30-D40-C30 kombinasyon grubu istatistiksel olarak en yüksek elastikiyet modülü değerlerini vermiştir.

### 5.3. CLT Duvarlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylere Ait Sonuçlar

1. Ladin duvarlarında en yüksek maksimum yük değeri, C30-C22-C30 grubundan elde edilmiştir.
2. Kızılâğaç duvarlarda en yüksek maksimum yük değeri, D18-D18-D18 grubundan elde edilmiştir.
3. Hibrit duvarlarda en yüksek maksimum yük değeri, D18-C22-D18 grubundan elde edilmiştir.
4. Ladin duvarlarında en yüksek maksimum yükteki deformasyon değeri C30-C22-C30 grubundan elde edilmiştir.
5. Kızılâğaç duvarlarda en yüksek maksimum yükteki deformasyon değeri D30-D18-D30 grubundan elde edilmiştir.
6. Hibrit duvarlarda en yüksek maksimum yükteki deformasyon değeri C16-D18-C16 grubundan elde edilmiştir.
7. CLT perde duvarların en yüksek rijitlik değerleri ladin duvarlar için C30-C16-C30 gruplarından elde edilmiştir.
8. CLT perde duvarların en yüksek rijitlik değerleri kızılâğaç duvarlar için D18-D18-D18 ve D40-D30-D40 gruplarından elde edilmiştir.
9. CLT perde duvarların en yüksek rijitlik değerleri hibrit duvarlar için ise D30-C30-D30 gruplarından elde edilmiştir.
10. Tüm grupların rijitlik değerleri 1,06 – 2,58 kN/mm arasında değişmiştir.

### 5.4. SAP 2000 Analizlerine Ait Sonuçlar

1. Her bir modele ait deneysel ve analitik veriler karşılaştırıldığında bütün gruplar için deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler ile SAP 2000' de oluşturulan modelden elde edilen veriler benzerlik göstermiştir.
2. Sonlu eleman modelinden elde edilen verilere göre CLT perde duvarların en yüksek rijitlik değerlerini ladin duvarlarda C30-C16-C30 gruplarından elde edilmiştir.
3. Sonlu eleman modelinden elde edilen verilere göre CLT perde duvarların en yüksek rijitlik değerlerini kızılâğaç duvarlarda D40-D40-D40 ve D40-D30-D40 gruplarından elde edilmiştir.

4. Sonlu eleman modelinden elde edilen verilere göre CLT perde duvarların en yüksek rijitlik değerlerini hibrit duvarlarda D30-C30-D30 ve C16-D30-C16 gruplarından elde edilmiştir.

##### 5.5. Yapay Sinir Ağları Analizlerine Ait Sonuçlar

1. Eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerine ait tahmin modellerinin en iyi performansları 500. İterasyonda sırasıyla 0,0047779 ve 0,0066944 olarak tespit edilmiştir. Liflere paralel makaslama direnci ve rijitlik tahmin modellerinde ise en iyi performanslar, 1000. İterasyonda sırasıyla 0,011219 ve 0,015936 olarak belirlenmiştir.
2. Eğilme direnci tahmin modelinin korelasyon katsayı (R) değeri, eğitim safhasında 0,99446 iken test safhasında 0,96191 olarak hesaplanmıştır. Elastikiyet modülü tahmin modelinde ise R değeri, eğitim safhasında 0,98135 iken test safhasında 0,96213 olarak hesaplanmıştır. Liflere paralel makaslama direnci tahmin modelinde R değeri, eğitim safhasında 0,98076 iken test safhasında 0,99361 olarak hesaplanmıştır. Rijitlik tahmin modelinde ise R değeri, eğitim safhasında 0,98454 iken test safhasında 0,93405 olarak hesaplanmıştır.
3. Eğilme direnci değerlerine ait MAPE değerleri, eğitim verileri için %1,04 ve test verileri için %3,90 olarak belirlenirken; elastikiyet modülü değerlerine ait MAPE değerleri, eğitim verileri için %1,95 ve test verileri için %4,26 olarak hesaplanmıştır. Liflere paralel makaslama direnci değerlerine ait MAPE değerleri, eğitim verileri için %1,77 ve test verileri için %3,16 olarak hesaplanırken; rijitlik değerlerine ait MAPE değerleri ise eğitim verileri için %1,85 ve test verileri için %3,80 olarak tespit edilmiştir.
4. Eğilme direnci eğitim ve test verileri için RMSE değerleri sırasıyla 0,37 ve 0,74 olarak hesaplanırken; elastikiyet modülü için bu değerler sırasıyla 333,62 ve 585,06 olarak belirlenmiştir. Liflere paralel makaslama direnci eğitim ve test verileri için RMSE değerleri sırasıyla 0,07 ve 0,12 olarak hesaplanırken; rijitlik için bu değerler sırasıyla 0,06 ve 0,08 olarak belirlenmiştir.

5. Analizler sonucunda elde edilen optimum kereste direnç sınıfları ve tabaka kombinasyonları, eğilme direnci için ladin CLT panellerde C24-C27-C24, kızılğaç CLT panellerde D18-D24-D18, hibrit panellerde C30-D40-C30 ve D18-C30-D18 olarak belirlenmiştir.
6. Optimum kereste direnç sınıfları ve tabaka kombinasyonları, elastikiyet modülü için ladin CLT panellerde C22-C27-C22, kızılğaç CLT panellerde D35-D30-D35, hibrit panellerde C16-D24-C16 ve D24-C24-D24 olarak belirlenmiştir.
7. Optimum kereste direnç sınıfları ve tabaka kombinasyonları, liflere paralel makaslama direnci için ladin CLT panellerde C27-C30-C27, kızılğaç CLT panellerde D40-D35-D40, hibrit panellerde C30-D40-C30 ve D40-C24-D40 olarak belirlenmiştir.
8. Optimum kereste direnç sınıfları ve tabaka kombinasyonları, rijitlik için ladin CLT panellerde C30-C18-C30, kızılğaç CLT panellerde D30-D35-D30, hibrit panellerde C30-D24-C30 ve D30-C30-D30 olarak belirlenmiştir.

## 6. ÖNERİLER

Son yıllarda yapısal ahşap malzeme teknolojisindeki gelişmeler ile, Avrupa ve Amerika başta olmak üzere dünyanın birçok yerinde çok katlı ahşap yapı konusunda yükselen bir eğilim olduğu görülmekte ve devlet politikalarında bu konu hakkında düzenlemeler yapıldığı belirtilmektedir. 2021 yılında güncellenen yapı kodları ile yüksek katlı ahşap yapıların inşasına olanak sağlanmış ve bu tür yapıların inşası için gerekli yapısal ahşap malzemelere talep önemli oranda artış göstermiştir. Tamamlanan bu çalışma ile yüksek katlı ahşap yapıların inşasında kullanılabilecek en popüler malzemelerden CLT üzerine önemli ve özgün araştırmalar yürütülmüştür. Elde edilen veriler ışığında hem endüstriyel hem de akademik anlamda kullanılabilecek bir veri seti ve optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Elde edilen veriler; yapı sektörünün köklü değişimler gösterdiği günümüzde ülkemiz ahşap yapı sektörü için hammadde açısından dışa bağımlılığın azaltılması ve CLT gibi yeni ürünlerin yerli ve milli kaynaklar ile üretimi ve yaygınlaşması adına önem arz etmektedir. Dolayısı ile yerli türlerin kullanımı ile CLT gibi yapısal mühendislik ahşap malzemelerinin üretimine ve araştırılmasına yönelik çalışmaların daha da artırılması gerektiği önerilebilir.

Çalışma kapsamında elde edilen veriler incelendiğinde yerli ve milli CLT malzemesinin uluslararası düzeyde rekabet edebilecek seviyelerde üretilbileceği belirlenmiştir. Dolayısı ile CLT' nin prefabrik üretime uygun, deprem dayanıklılığı yüksek, ekonomik ve hızlı inşa süresi, sağlıklı, kararlı, ekolojik, sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir olması gibi avantajları nedeniyle deprem bölgeleri başta olmak üzere afet sonrası kaliteli yaşam alanlarının hızlı ve güvenli bir şekilde kurulabilmesi için dikkate alınması gerektiği önerilmektedir.

YSA ile elde edilen optimum sonuçlar ülkemizde CLT üretim miktarlarının artırılması ve pazardaki rekabet gücünün geliştirilmesi açısından ahşap yapı ve orman ürünleri sektörünün kullanabileceği nitelikte olup, ileride yapılacak çalışmalar içinde özgün bir kaynak olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

Her bir modele ait deneysel ve analitik sonuçlar karşılaştırıldığında, tanımlanan varyasyon grupları için deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler ile SAP 2000' de oluşturulan modelden elde edilen veriler ile örtüştüğü görülmektedir. Dolayısı ile analitik kurulan model başarılı olarak nitelendirilebilir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, yapı

kurulması inşası ve tahribatlı testi yapmadan sadece malzeme özelliklerinden gidilerek yapının olası yanal yükler altında sergileyeceği davranış tahmin edilebilecektir. Bu model, malzeme kalitesinin belirlenmesi açısından önemli bir işgücü ve maliyet tasarrufu sağlayacağından ilgili sektör için önerilebilir.

Bu çalışma ile yerli CLT üretimi için malzeme bazında optimum üretim şartların ortaya koyulduğu bir model oluşturularak ilgili sektör ve akademik paydaşların kullanımına sunulmuştur. Bundan sonraki çalışmalar için, bu çalışmadan elde edilen veriler ışığında bire bir ölçekte yüksek katlı CLT bir ahşap yapının inşa edilerek deprem ve yangın anında gösterdiği performansın belirlenmesi önerilmektedir.



## 7. KAYNAKLAR

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). Projeto de estruturas de Madeira, ABNT 7190. Rio de Janeiro, Brazil.
- Aicher, S., Christian, Z., & Hirsch, M. (2016a). Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations, *Holzforschung*, 70, 8, 773-781.
- Aicher, S., Hirsch, M., & Christian, Z. (2016b). "Hybrid cross-laminated timber plates with beech wood cross-layers", *Construction and Building Materials*, 124, 1007-1018.
- Akyüz, M. (1997). *Doğu Ladini (Picea Orientalis (L.) Link.) Odununun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri*. Doğu Karadeniz Ormancılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Teknik Bülten Serisi, 3, 71-88.
- Akyüz, M. (1998). Kızılağacın Odun Özellikleri ve Kullanım Özellikleri. *KTÜ Orman Fakültesi Orman Mülkiyet Sorunları Sempozyumu*, s. 6-8. Trabzon.
- Alia Syahirah, Y., Anwar, U. M. K., Lee, S. H., Ong, C. B., Asniza, M., & Paridah, M. T. (2024). The Properties of Cross Laminated Timber (CLT): A Review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 103924.
- Altunışık, A. C. (2010). *Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Anderson, R. (2016). A CLT manufacturing plant: if you build it will the lumber come. *In Massive Timber Conference*.
- Anonim. (1997). *Doğu Karadeniz Ormanlarının Gençleştirilmesi ve Ağaçlandırılması, İyileştirilmesi Sorunları ve Çözüm Önerileri*. Trabzon: T.C. Orman Bakanlığı, Orman Genel Müdürlüğü, Trabzon Orman Bölge Müdürlüğü.
- ANSI/APA PRG 320-2012. (2019). Standard for performance-rated cross-laminated timber. Washington, DC: American National Standards Institute.
- Anşın, R., & Özkan, Z. C. (1993). *Tohumlu Bitkiler – Odunsu Taksonlar*. Trabzon: K.T.Ü. Orman Fakültesi Yayınları.
- Antanasijević, DZ., Pocajt, VV., Povrenović, DS., Ristić, MĐ., & Perić-Grujić, AA. (2013). PM10 emission forecasting using artificial neural networks and genetic algorithm input variable optimization, *Science of the Total Environment*, 443, 511-519.
- APA. (2016). Cross-Laminated Timber. APA – The Engineered Wood Association. Form No. S500. pp.
- Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). Mechanical properties of wood: A review. *Forests*, 14 (6), 1202.

- ASTM E119. (2012). Standard test methods for fire tests of building construction and materials. ASTM E119. West Conshohocken, A, United States. American Society for Testing and Materials.
- ASTM E72. (2014). Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction. ASTM E72. West Conshohocken, A, United States. American Society for Testing and Materials.
- Atkins, D., Anderson, R., Dawson, E., & Muszynski, L. (2022). *International Mass Timber Report: 2024*. Forest Business Network.
- Ayanleye, S., Udele, K., Nasir, V., Zhang, X., & Militz, H. (2022). Durability and protection of mass timber structures: A review. *Journal of Building Engineering*, 46, 103731.
- Bal, B. C., & Bektaş, İ. (2018). Odunun yoğunluğu ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 51-61.
- Barham, L., Duller, G. A. T., Candy, I., Scott, C., Cartwright, C. R., Peterson, J. R., Kabukcu, C., Chapot, M.S., Melia, F., Rots, V., George, N., Taipale, N., Gethin, P., & Nkombwe, P. (2023). Evidence for the earliest structural use of wood at least 476,000 years ago. *Nature*, 622(7981), 107-111.
- Batu, F., & Kapucu, F. (1995). Doğu Karadeniz Bölgesi kızılğac mescerelerinde bonitet endeks ve hasilat tablosunun düzenlenmesi, *1. Ulusal Ormancılık Karadeniz Kongresi*, 348-363, 23-25 Ekim 1995, Trabzon.
- Beck Group, (2015). California assessment of wood business innovation opportunities and markets, phase 2 report.
- Bektaş, İ., Güler, C., & Baştürk, M.A. (2002). Principal mechanical properties of eastern beech wood (*Fagus orientalis* L.) naturally grown in Andırın northeastern mediterranean region of Turkey, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 26 (3), 147–154.
- Benoit, Y., & Sandoz, J. L., (2007). Timber grading machine using ultrasonic and density measurements: Triomatic. In *15th international symposium on nondestructive testing of wood*, Duluth, MN, USA.
- Bergman, R. D., & Bowe, S. A. (2010). Environmental impact of manufacturing softwood lumber in northeastern and north central United States. *Wood and Fiber Science*, 67-78.
- Bergman, R., Puettmann, M., Taylor, A., & Skog, K. E. (2014). The carbon impacts of wood products. *Forest Products Journal*, 64(7-8), 220-231.
- Berkel, A. (1972). Ağaç Malzeme Teknolojisi. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi, İÜ Yayınları*, 147.

- Birinci, A. U., Ozturk, H., Demir, A., Ilhan, O., Gezer, E. D., & Demirkir, C. (2024). Determining the effects of timber strength and wood species on the mechanical properties of CLT using non-destructive and destructive methods. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 1-16.
- Birinci, A. U., Öztürk, H., Demirkir, C., & Çolakoğlu, G. (2020). Structural performance analysis of cross laminated timber (CLT) Produced from pine and spruce grown in Turkey. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 5(5), 819-824.
- Bobadilha, G. S., Stokes, C. E., & Verly Lopes, D. J. (2021). Artificial neural networks modelling based on visual analysis of coated cross laminated timber (CLT) to predict color change during outdoor exposure. *Holzforschung*, 75(7), 646-654.
- Bowers, T., Puettmann, M. E., Ganguly, I., & Eastin, I. (2017). Cradle-to-gate life-cycle impact analysis of glued-laminated (glulam) timber: Environmental impacts from glulam produced in the US Pacific northwest and southeast. *Forest Products Journal*, 67(5-6), 368-380.
- Bowyer, J., Bratkovich, S., Frank, M., Fernholz, K., Howe, J. & Stai, S. (2011). Managing forests for carbon mitigation. *Dovetail Partners. Inc.*, Minneapolis, Minnesota, 16pp.
- Bozkurt, A. Y. (1992). Odun Anatomisi, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları*, 415.
- Bozkurt, Y., & Erdin, N. 1995. Yoğunluk ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiler, *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 45, 2, 11-34.
- Brandner, R. (2013). Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. In *Focus solid timber solutions-European conference on cross laminated timber (CLT)* (pp. 3-36). University of Bath.
- Brandner, R. (2018). Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: Testing, properties, design and recommendations for harmonizing design provisions for structural timber products. *Engineering Structures*, 171, 944-960.
- Brandt, K., Wilson, A., Bender, D., Dolan, J. D., & Wolcott, M. P. (2019). Techno-economic analysis for manufacturing cross-laminated timber. *BioResources*, 14(4), 7790-7804.
- Brenemen, S., Timmers, M., & Richardson, D. (2024 Mayıs 19). *Tall Wood Buildings in the 2021 IBC*. [https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/wood\\_solution\\_paper-tall-wood.pdf](https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/wood_solution_paper-tall-wood.pdf)
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2000). Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition. In *IMAC 18: Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas, USA, February 7-10, 2000* (pp. 625-630).
- Brunetti, M., Nocetti, M., Pizzo, B., Negro, F., Aminti, G., Burato, P., Cremonini, C., & Zanuttini, R. (2020). Comparison of different bonding parameters in the production of beech and combined beech-spruce CLT by standard and optimized tests methods. *Construction and Building Materials*, 265, 120168.

- BSI, (2013). BS EN 1912:2012: Structural Timber — Strength classes — Assignment of visual grades and species. BS EN 1912. UK: BSI Standards Publication.
- BSI, (2016a). BS EN 14081-1:2016: Timber structures — Strength graded structural timber with rectangular cross section, Part 1: General requirements. BS EN 14081-1. UK: BSI Standards Publication.
- BSI, (2016b). BS EN 338:2016: Structural timber — Strength classes. BS EN 338. UK: BSI Standards Publication.
- BSI, (2017). BS 4978:2007+A2:2017: Visual strength grading of softwood — Specification, BS 4978:2007+A2. UK: BSI Standards Publication.
- Buchanan, A. H., John, S., Love, S. & (2012). LCA and carbon footprint of multi-storey timber buildings compared with steel and concrete buildings, *World*, 15, 19.
- Buck, D., & Hagman, O. (2023). Multivariate Image Analysis Applied to Cross-Laminated Timber: Combined Hyperspectral Near-Infrared and X-ray Computed Tomography. *Journal of Spectroscopy*, 2023(1), 3954368.
- Bucur, V. (2003). Nondestructive characterization and imaging of wood. *Springer*. Science & Business Media.
- Burnett, E., (2005). *Building Science for Building Enclosures*, Building Science Corporation. Somerville, United States.
- California Department of General Services. (2024, Haziran 21). *Buy Clean California Act*, <https://www.dgs.ca.gov/PD/Resources/Page-Content/Procurement-Division-Resources/List-Folder/Buy-Clean-California-Act>.
- Callegari, G., Cremonini, C., Rocco, V. M., Spinelli, A., & Zanuttini, R. (2010). The production of hardwood X-Lam panels to valorise the forest-wood chain in piemonte (Italy). In *WTCE-World Conference on Timber Engineering 2010-Book of Abstracts* (Vol. 4, pp. 809-810). Ario Ceccotti and Jan-Willem Van de Kuilen.
- Canadian Wood Council, (2024, Mayıs 21). *Tall Wood Buildings*, <https://cwc.ca/en/how-to-build-with-wood/building-systems/tall-wood-buildings>.
- Cao, Y., Street, J., Li, M., & Lim, H. (2019). Evaluation of the effect of knots on rolling shear strength of cross laminated timber (CLT). *Construction and Building Materials*, 222, 579-587.
- Casagrande, D., Rossi, S., Sartori, T., & Tomasi, R., (2016). Proposal of an analytical procedure and a simplified numerical model for elastic response of single-storey timber shear-walls, *Construction and Building Materials*, 102, 1101-1112.
- Ceccotti, A., Follesa, M., Lauriola, M.P. & Sandhaas, C., (2006). Sofie Project, *Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismicity*, Geneva, Switzerland.

- Ceccotti, A., Sandhaas, C., & Yasumura, M. (2010). Seismic behaviour of multistory cross-laminated timber buildings. In *Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe-Timber Committee* (pp. 1-14).
- Chen, C. X., Pierobon, F. & Ganguly, I. (2019). Life Cycle Assessment (LCA) of Cross-Laminated Timber (CLT) produced in Western Washington: The role of logistics and wood species mix, *Sustainability*, 11, 5, 1278.
- Chen, Y., (2011). *Structural Performance Of Box Based Cross Laminated Timber System Used In Floor Applications*, Doctoral Dissertation. University of British Columbia. Vancouver, Canada.
- Christovasilis, I. P., Brunetti, M., Follesa, M., Nocetti, M., & Vassallo, D. (2016). Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories. *Construction and building materials*, 122, 202-213.
- Climate Action Reserve. (2024, Ekim 01). *Forest Protocol Version 5.0*, <https://www.climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2023/07/US-Forest-Protocol-v5.0-new-cover.pdf>
- Concu, G., De Nicolo, B., Riu, R., Trulli, N., Valdes, M., & Fragiaco, M. (2016). Sonic testing on cross laminated timber panels. In *Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation-Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation* 1727-1730. CRC Press.
- Concu, G., Fragiaco, M., Trulli, N., & Valdès, M. (2017). Non-destructive assessment of gluing in cross-laminated timber panels. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 226, 559-569.
- CORRIM, (2006). Forests, Carbon and Climate Change: A Synthesis of Science Findings. Chapter 7: using wood products to reduce global warming, Oregon Forest Resources Institute. Portland, Oregon.
- Council, B. S. L. (2017). Nail Laminated Timber: US Design & Construction Guide v1. 0, *Binational Softwood Lumber Council: Surrey, BC, Canada*.
- Craft, S. (2011). Fire performance of CLT assemblies. In *Cross Laminated Timber Symposium*, FPInnovations, Vancouver, BC, Canada, February (pp. 8-9).
- Crawford, D., Hairstans, R., Smith, S. & Papastavrou, P. (2015). Viability of cross-laminated timber from UK resources, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 168, 3, 110-120.
- Crawford, D., Hairstans, R., & Smith, R.E., (2014). Feasibility of Cross-Laminated Timber Production from UK Sitka spruce, *European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)*. Graz, Austria: The University of Bath, pp. 37–52.
- Crespell, P., & Gagnon, S., (2010). Cross Laminated Timber: a Primer. *Special publication*, 52, FPInnovations. Vancouver, Canada.

- Crovella, P., Smith, W., & Bartczak, J. (2019). Experimental verification of shear analogy approach to predict bending stiffness for softwood and hardwood cross-laminated timber panels, *Construction and Building Materials*, 229, 116895.
- Çalıova, Z. (2011). *Kızılağaç ve Doğu Ladini Odunlarının Bazı Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkisi*, Karabük Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Mobilya Dekorasyon Eğitimi ABD., Y. Lisans Tezi.
- Dagenais, C., White, R., & Sumathipala, S., (2012). Fire Performance of Cross-Laminated Timber, *Presentation at the Cross-Laminated Timber Symposium*. 28 February. Seattle, United States.
- Demir, A., Çolak, S., & Demirkır, C., (2024). *Yapısal Ahşap Esaslı Kompozitler*. Ahşap Malzeme ve Yapı Tasarımı (pp.1-21), Ankara: Duvar Yayınları.
- Demir, A., Demirkır, C., Özsahin, S., & Aydın, I. (2023). Artificial neural-network optimisation of nail size and spacings of plywood shear wall, *Wood Material Science & Engineering*, 18, 1, 97-106.
- Demirkır, C., Özsahin, Ş., Aydın, I. & Colakoglu, G., (2013). Optimization of some panel manufacturing parameters for the best bonding strength of plywood, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 46, 14-20.
- DIN/EN 204. (2001). Classification of thermoplastic wood adhesives for non-structural applications, European Committee for Standardization.
- Di Bella, A. & Mitrovic, M. (2020). Acoustic Characteristics of Cross-Laminated Timber Systems, *Sustainability*, 12, 14, 5612.
- Diebold, R., Schleifer, A., & Glos, P. (2000). Machine grading of structural sawn timber from various softwood and hardwood species. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, pp. 139-146. Sopron, Hungary: University of Western Hungary.
- Dong, Q., Xing, K., & Zhang, H. (2017). Artificial neural network for assessment of energy consumption and cost for cross laminated timber office building in severe cold regions, *Sustainability*, 10, 1, 84.
- Dong, W., Wang, Z., Chen, G., Wang, Y., Huang, Q. & Gong, M. (2023). Bonding performance of cross-laminated timber-bamboo composites, *Journal of Building Engineering*, 63, 105526.
- Duan, Z., Huang, Q., Sun, Q. & Zhang, Q. (2022). Comparative life cycle assessment of a reinforced concrete residential building with equivalent cross laminated timber alternatives in China, *Journal of Building Engineering*, 62, 105357.
- Dugmore, M., Nocetti, M., Brunetti, M., Naghizadeh, Z., & Wessels, C.B. (2019). Bonding quality of cross-laminated timber: Evaluation of test methods on Eucalyptus grandis panels, *Construction and Building Materials*, 211, 217-227.

- Dungani, R., Sulistyono, Karliati, T., Suhaya, Y., Malik, J., Alpian, & Supriyati, W. (2023). Analysis Behavior of Openings on Full-Size Cross-Laminated Timber (CLT) Frame Shear Walls Tested Monotonically, *Forests*, 14, 1, 97.
- Engineered Wood Association, (2024, Mayıs 26). *Sustainable Buildings, Sustainable Future*, <https://www.apawood.org/publication-search?q=F305&tid=1>
- Environmental Defense Fund. (2024, Mayıs 22). *How cap and trade works*, <https://www.edf.org/climate/how-cap-and-trade-works>.
- Erdin, N., & Bozkurt, Y. (2013). Odun anatomisi. *İstanbul Üniversitesi Yayınları*.
- Espinoza, O., & Buehlmann, U. (2018). Cross-laminated timber in the USA: Opportunity for hardwoods?. *Current Forestry Reports*, 4, 1-12.
- Essoua, G. G. E., & Blanchet, P. (2017). Cross laminated timber made from large-leaf beech: Production, characterization and testing. *In 6th International Scientific Conference on Hardwood Processing* (pp. 208-212).
- Ettelaie, A., Taoum, A., Shanks, J., & Nolan, G. (2022). Evaluation of the bending properties of novel cross-laminated timber with different configurations made of Australian plantation *Eucalyptus nitens* using experimental and theoretical methods. *In Structures* 42, 80-90.
- Faircloth, A., Brancheriau, L., Karampour, H., & Kumar, C. (2024). Evaluation of full-sized and thick cross-laminated timber using in-line non-destructive techniques. *Wood Material Science & Engineering*, 19(3), 660-673.
- Fakopp. (2024, Haziran 22). *Screw Withdrawal Force Meter*, <https://www.fakopp.com/en/product/withdrawal/>.
- Falk, A., (2005). *Architectural Aspects Of Massive Timber. Structural Form and Systems*, Luleå University of Technology. Department of Civil and Environmental Engineering. Doctorate Dissertation, Luleå, Sweden.
- FAO, (2024, Mayıs 01). FAOSTAT Online statistical service. <http://www.fao.org/faostat>.
- Farniev, D. (2019). Vigorous growth of cross laminated timber to be expected. *Panels & Furniture*. Asia, 44-46.
- FEMA, (2001). Report of a testing program of lightframed walls with wood-sheathed shear walls. Rep. No. FEMA-DR-1008-8011, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Fernholz, K., Groot, H., Bowyer, J., Pepke, E., Jacobs, M., Erickson, G., & McFarland, A. (2021). Carbon storage, credit markets, and forests: What do we have and what do we need? Report prepared by Dovetail Partners. Available at <https://dovetailinc.org/upload/tmp/1632144382.pdf>.
- Fink, G., Kohler, J. & Brandner, R. (2018). Application of European design principles to cross laminated timber. *Engineering Structures*, 171, 934-943.

- Flatscher, G., Bratulic, K., & Schickhofer, G. (2015). Experimental tests on cross-laminated timber joints and walls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 168, 11, 868-877.
- Follesa, M., & Fragiaco, M. (2018). Force-based seismic design of mixed CLT/Light-Frame buildings, *Engineering Structures*, 168, 628-642.
- Forest Products Laboratory, (2010). *Wood Handbook wood as an engineering material*. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Madison, Wisconsin.
- Forest Trends' Ecosystem Marketplace. (2021). State of Forest Carbon Finance 2021, Washington, DC: Forest Trends Association.
- FPInnovations, (2013). *CLT Handbook*. FPInnovations. Montreal, Canada.
- Frangiaco, M., Riu, R., & Scotti, R. (2015). Can Structural Timber Foster Short Procurement Chains within Mediterranean Forest? A Research Case in Sardinia *South-east European forestry: SEEFOR*, 6(1), 107-117
- Frangi, A., Fontana, M., Hugi, E., & Joebstl, R., (2009). Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire, *Fire Safety Journal*, 44, 1078–1087.
- Franke, S. (2016). Mechanical properties of beech CLT, *In Proceedings of the WCTE 2016 world conference on timber engineering*, pp. 22-25, Vienna, Austria.
- Gavric, I., Fragiaco, M., & Ceccotti, A. (2015). Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures. *Materials and structures*, 48, 1841-1857.
- Gezer, E. D., Birinci, A. U., Demir, A., Öztürk, H., İlhan, O., & Demirkir, C. (2024). Determining the optimum layer combination for cross-laminated timber panels according to timber strength classes using Artificial Neural Networks. *BioResources*, 19(3), 4899.
- Gil-Moreno, D., Ridley-Ellis, D., O'Ceallaigh, C., & Harte, A. M. (2022). The relationship between bending and tension strength of Irish and UK spruce and pine. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(3), 585-596.
- Gong, M., (2021). Wood and Engineered Wood Products: Stress and Deformation”, *In Engineered Wood Products for Construction*. London, IntechOpen.
- Gong, M., Tu, D., Li, L., & Chui, Y.H. (2015). Planar shear properties of hardwood cross layer in hybrid cross laminated timber, *ISCHP 2015*, 85-90.
- Görgün, H.V. (2013). *Ahşap Kirişlerde Eğilme Direnci Ve Elastikiyet Modülünün Tahribatsız Ve Tahribatlı Test Yöntemleri İle Belirlenmesi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Görlacher, E. (2002). Ein verfahren zur ermittlung des rollschubmoduls von holz, *Holz als Roh und Werkstoff*, 60, 5, 317-324.

- Green, M., & Karsh, E. (2012). Tall wood: the case for tall wood buildings, Wood Enterprise Coalition, Vancouver, Canada.
- Gsell, D., Feltrin, G., Schubert, S., Steiger, R., & Motavalli, M. (2007). Cross-laminated timber plates: Evaluation and verification of homogenized elastic properties, *Journal of structural engineering*, 133, 1, 132-138.
- Guo, H., Liu, Y., Chang, W. S., Shao, Y., & Sun, C. (2017). Energy saving and carbon reduction in the operation stage of cross laminated timber residential buildings in China. *Sustainability*, 9, 2, 292.
- Güller, B. & Ay, N. (2001). Artvin Yöresi Sakallı Kızılağaç (*Alnus glutinosa* subsp. *barbata* (C.A. Mey.) Yalt.) Odununun Bazı Mekanik Özellikleri. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 25 (2): 129-138
- Hadigheh, S. A., & Dias-da-Costa, D. (2020). Shear strength of cross laminated timber-concrete connections reinforced with carbon fibre polymer composites. In *ACMSM25: Proceedings of the 25th Australasian Conference on Mechanics of Structures and Materials*. pp. 179-185. Singapore: Springer Singapore.
- Hanhijärvi, A., Ranta-Maunus, A. (2008). Development of strength grading of timber using combined measurement techniques, *Report of the Combigrade project-phase, 2*.
- Hassanieh, A., Valipour, H. R., & Bradford, M.A. 2017. Experimental and numerical investigation of short-term behaviour of CLT-steel composite beams, *Engineering Structures*, 144, 43-57.
- He, M., Sun, X., Li, Z., & Feng, W. (2020). Bending, shear, and compressive properties of three-and five-layer cross-laminated timber fabricated with black spruce. *Journal of Wood Science*, 66, 1-17.
- Hematabadi, H., Madhoushi, M., Khazaeyan, A., Ebrahimi, G., Hindman, D., & Loferski, J. (2020). Bending and shear properties of cross-laminated timber panels made of poplar (*Populus alba*), *Construction and Building Materials*, 265, 120326.
- Hindman, D. P., & Golden, M. V. (2020). Acoustical Properties of Southern Pine Cross-Laminated Timber Panels. *Journal of Architectural Engineering*, 26(2), 05020004.
- Hindman, D.P., & Bouldin, J.C. (2015). Mechanical Properties of Southern Pine Cross-Laminated Timber, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27, 9, 1–7.
- Hsu WE., (2016). Structural Composite Lumber Manufacturing, *CreateSpace Independent Publishing Platform*, Scotts Valley, California, USA.
- Huang, Z., Huang, D., Chui, Y. H., Shen, Y., Daneshvar, H., Sheng, B., & Chen, Z. (2022). Modeling of Cross-Laminated Timber (CLT) panels loaded with combined out-of-plane bending and compression, *Engineering Structures*, 250, 113335.
- Hung, C. C., Hsu, S. C., & Cheng, K. L. (2019). Quantifying city-scale carbon emissions of the construction sector based on multi-regional input-output analysis, *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 75-85.

- Hunt, A. A. (2018). Wood and evolving codes: the 2018 IBC and emerging wood Technologies, *Architectural Record*.
- Huo, L., Zhu, E., Niu, S., & Wu, G. (2022). Analysis and tests of lateral resistance of bolted and screwed connections of CLT, *Forests*, 13, 3, 375.
- ISO. (2006a). 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. (2006b). 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirement and guidelines, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jayalath, A., Navaratnam, S., Ngo, T., Mendis, P., Hewson, N., & Aye, L. (2020). Life cycle performance of Cross Laminated Timber mid-rise residential buildings in Australia, *Energy and Buildings*, 223, 110091.
- Johansson, E., & Svenningsson, A. (2018). Delamination of cross-laminated timber and its impact on fire development| Focusing on different types of adhesives. *LUTVDG/TVBB*.
- Karacabeyli, E., & Gagnon, S. (2019). Cross laminated timber (CLT) handbook. FPInnovations: Vancouver, BC, Canada.
- Kasal, B., Drdacky, M., & Jirovsky, I. (2003): Semi-destructive methods for evaluation of timber structures, *In: WIT Transactions on the Built Environment – 2003*, p. 835–842.
- Kaufmann, H. (2011). Wood Works: Ökorationale Baukunst—Architecture Durable, Springer. Heidelberg, Germany.
- Kayvani, K., (2014). Design of high-rise buildings: past, present and future. In *23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, 1, 15-20.
- Keskin, H. (2009). Lamine Edilmiş Doğu Ladini (*Picea Orientalis* Lipsky) Odununun Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. *Turkish Journal of Forestry*, 4(1), 138-151.
- Kippel, M., Leyder, C., Frangi, A., Fontana, M. Lam, F. & Ceccotti. (2014). Fire tests on loaded cross-laminated timber wall and floor elements, *Fire Safety Science*, 11, 626-639.
- Kirkegaard, A., (2012). *Aesthetic Qualities of Cross Laminated Timber*, Doctorate dissertation. Department of Civil Engineering, The Faculty of Engineering and Science, Aalborg University. Aalborg, Denmark.
- Kloiber, M., Drdácý, M., Machado, J. S., Piazza, M., & Yamaguchi, N., (2015). Prediction of mechanical properties by means of semi-destructive methods: A review, *Construction and Building Materials*, 101, 1215–1234.
- Kollmann, F., & Cote, W.A. (1968). Principles of wood science and technology, *Springer*, Verlag.

- Kramer, A., Barbosa, A.R., & Sinha, A. (2014). Viability of Hybrid Poplar in ANSI Approved Cross-Laminated Timber Applications, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26, 7, p.06014009.
- Krauss, K., Li, M., & Lam, F. (2023). Influence of mixed-angle screw installations in CLT on the cyclic performance of commercial hold-down connections. *Construction and Building Materials*, 364, 129918.
- Kuklik, P., & Hansen, A. S. (2008). Handbook 2—Design of Timber Structures According to EC 5, Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/06/B/F/PP/168007: Prague, Czech Republic
- Kumar, C., Faircloth, A., Shanks, J., McGavin, R. L., Li, X., Ashraf, M., & Subhani, M. (2023). Investigating Factors Influencing Rolling Shear Performance of Australian CLT Feedstock, *Forests*, 14, 4, 711.
- Kumar, C., Li, X., Subhani, M., Ashraf, M., Shanks, J., Dakin, T., & McGavin, R. L. (2022). A review of factors influencing rolling shear in CLT and test methodology, *Journal of Testing and Evaluation*, 50, 3, 1634-1656.
- Küçükönder, H., Boyacı, S., & Akyüz, A. (2016). A modeling study with an artificial neural network: developing estimation models for the tomato plant leaf area, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 40, 2, 203-212.
- Larasatie, P., Albee, R., Muszynski, L., Guerrero, J. E. M., & Hansen, E. (2020). Global CLT industry survey: The 2020 updates, *In World Conference on Timber Engineering*; WCTE: Santiago, Chile 1-8.
- Lattke, F., & Lehmann, S. (2007). Multi-storey timber constructions: Recent trends, *J. Green Building*, 2, 119–130.
- Lauriola, M.P., & Sandhaas, C., (2006). Quasi-Static and Pseudo-Dynamic Tests on XLAM Walls and Buildings, *COST E29 International Workshop on Earthquake Engineering on Timber Structures*, Coimbra, Portugal.
- Layton P.A., (2020). Mass Timber and Sustainability, *Building Sustainably with Mass Timber Virtual Workshop*, December 10th.
- Lehmann, S. (2013). Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions, *Sustainable Cities and Society*, 6, 57-67.
- Lehmann, S., & Hamilton, C. (2011). Sustainable Infill Development using Low Carbon CLT Prefabrication: Adaptation for the South Australian Context, *Zero Waste SA Research Centre for Sustainable Design and Behaviour: University of South Australia, Adelaide, Australia*.
- Li, H., Wang, L., Wang, B. J., Wei, P., Yu, W., Fan, Z., & Du, G. (2021). Preliminary evaluation of a density-based lumber grading method for hem-fir CLT manufacturing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79, 967-975.

- Li, M., & Lam, F. (2015). Lateral behaviour of cross laminated timber shear walls under reversed cyclic loads, In *Proc., 10th Pacific Conf. on Earthquake Engineering*, 1-8.
- Liang, S., Gu, H., Bergman, R., & Kelley, S. S. (2020). Comparative life-cycle assessment of a mass timber building and concrete alternative, *Wood and Fiber Science*, 52, 2, 217–229.
- Liao, Y., Tu, D., Zhou, J., Zhou, H., Yun, H., Gu, J., & Hu, C. (2017). Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers, *Construction and Building Materials*, 132, 508-515.
- Lie, X., Subhani, M., Ashraf, M., Kafle, B., & Kremer, P. (2020). A current-state-of-the-art on design rules vs test resistance of Cross Laminated Timber members subjected to transverse loading, In *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure*, pp. 185-190, Springer, Singapore.
- Lippke, B., Oneil, E., Harrison, R., Skog, K., Gustavsson, L., & Sathre, R. (2011). Wood products reduce carbon dioxide emission levels, *Carbon Management*, 3, 303–333.
- Llana, D. F., González-Alegre, V., Portela, M., & Íñiguez-González, G. (2022). Cross Laminated Timber (CLT) manufactured with European oak recovered from demolition: Structural properties and non-destructive evaluation. *Construction and Building Materials*, 339, 127635.
- Llana, D. F., Short, I., & Harte, A. M. (2020). Use of non-destructive test methods on Irish hardwood standing trees and small-diameter round timber for prediction of mechanical properties. *Annals of forest science*, 77, 1-13.
- Luengo, E., Hermoso, E., Cabrero, J. C., & Arriaga, F. (2017). Bonding strength test method assessment for Cross-Laminated Timber Derived Stressed-Skin Panels (CLT SSP), *Materials and Structures*, 50, 4, 204.
- Lyons, A. (2010). *Materials for Architects and Builders*, (4th ed). Oxford, UK: ButterWorth Heinemann, ISBN 9780080949598.
- Ma, Y., & Dai, Q. (2023). Lateral Performance Simulation of Conventional CLT Shear Wall and Structure by Equivalent Decomposed Wall Model, *Journal of Structural Engineering*, 149, 1, 04022214.
- Machado, J. S., Louzada, J. L., Santos, A. J., Nunes, L., Anjos, O., Rodrigues, J., Simões, R.M.S., & Pereira, H. (2014). Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 975-980.
- Maithani, P., Chauhan, S. S., & Sethy, A. K. (2023). Polyurethane bonded cross-laminated timber prepared from *Pinus radiata*, *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 1-6.
- Malkoçoğlu, A. (1994). *Doğu kayını (Fagus Orientalis L.) odununun teknolojik özellikleri*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.

- Mallo, M. F. L. (2014). *Awareness, Perceptions and Willingness to Adopt Cross-Laminated Timber in the United States*, University of Minnesota, Doctoral dissertation.
- Malmsheimer, R., Heffernan, P., Brink, S., Crandall, D., Deneke, F., Galik, C., & Gee, E. (2008). Management Solutions for Mitigating Climate Change in the United States, *Journal of Forestry*, 115-171.
- Mamikoğlu, NG. (2015). *Türkiye'nin ağaçları ve çalıları*, NTV Yayınları, 6. Baskı, Ankara.
- Marko, G., Bejő, L., & Takats, P. (2016). Cross-laminated timber made of Hungarian raw materials. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 123, No. 1, p. 012059. IOP Publishing.
- McKeever, D. B., (1997). *Engineered wood products: a response to the changing timber resource*, Pacific Rim Wood Market Report, 123, 5, 15.
- Merev, N. (1983). *Türkiye Kızılağaç (Alnus Mill.)'ları Odunlarının İç Yapıları*, Trabzon: K.T.Ü. Orman Fakültesi Yayınları, Yayın No: 7/2.
- Milaj, K., Sinha, A., Miller, T. H., & Tokarczyk, J. A. (2017). Environmental utility of wood substitution in commercial buildings using life-cycle analysis, *Wood and Fiber Science*, 49, 3, 338–358.
- Mohamadzadeh M. & Hindman D. (2015). *Mechanical Performance of Yellow-Poplar Cross-Laminated Timber*, Virginia Polytechnic Institute And State University, Department of Civil and Environmental Engineering, Blacksburg.
- Moreno-Fernández, D., Hevia, A., Majada, J., & Cañellas, I. (2018). Do common silvicultural treatments affect wood density of Mediterranean montane pines?. *Forests*, 9(2), 80.
- Moser K. (1995). DickholzdurchVakuum [Dickholzthroughvacuum]. Bauen mit *Holz*, 11, 941–947 (in German).
- Muñoz, F., Tenorio, C., Moya, R., & Navarro-Mora, A. (2022). CLT fabricated with Gmelina arborea and Tectona grandis wood from fast-growth forest plantations: Physical and mechanical properties, *Journal of Renewable Materials*, 10, 1, 1.
- Musah, M., Wang, X., Dickinson, Y., Ross, R. J., Rudnicki, M., & Xie, X. (2021). Durability of the adhesive bond in cross-laminated northern hardwoods and softwoods, *Construction and Building Materials*, 307, 124267.
- Muster, M., & Frangi, A. (2020). Experimental analysis and structural modelling of the punching behaviour of continuous two-way CLT flat slabs, *Engineering Structures*, 205, 110046.
- Muszynski, L., Hansen, E., Fernando, S., Schwarzmann, G., & Rainer, J. (2017). Insights into the global cross-laminated timber industry. *BioProducts Business*, 77-92.

- Nakano, K., Koike, W., Yamagishi, K., & Hattori, N. (2020). Environmental impacts of cross-laminated timber production in Japan, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 10, 2193-2205.
- Navaratnam, S., Christopher, P. B., Ngo, T., & Le, T. V. (2020). Bending and shear performance of Australian Radiata pine cross-laminated timber, *Construction and Building Materials*, 232, 117215.
- NEFF -New England Forestry Foundation. (2024, Temmuz 01). \$30 million USDA climate-smart commodities award to increase carbon storage In New England's forests. <https://newenglandforestry.org/30-million-usda-award/>
- Nepal, P., Skog, K. E., McKeever, D. B., Bergman, R. D., Abt, K. L., & Abt, R. C. (2016). Carbon mitigation impacts of increased softwood lumber and structural panel use for nonresidential construction in the United States, *Forest Products Journal*, 66, 1–2, 77–87.
- O'Dowd, B., Cunningham, L., & Nedwell, P. (2016). Briefing experimental and theoretical bending stiffness of Cross-Laminated Timber panels, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 169, 6, 277-281.
- Odabaşı T., Çalışkan A. & Bozkuş HF. (2004). *Silvikültür tekniği (silvikültür II)*, İÜ Yayın No: 4459, OF Yayın No: 475.İstanbul, 314 s.
- Okabe, M., Yasumura, M., Kobayashi, K., & Fujita, K. (2014). Prediction of bending stiffness and moment carrying capacity of sugi cross-laminated timber, *Journal of wood science*, 60, 49-58.
- OMA. (2006). *Operational Modal Analysis, Release 4.0*, Structural Vibration Solution A/S, Denmark
- Oneil, E., & Lippke, B. (2010). Integrating products, emission offsets, and wildfire into carbon assessments of inland northwest forests, *Wood and Fiber Science*, 42, 144–164.
- Ong, C. B. (2015). Glue-laminated timber (Glulam), *Wood composites*, 123-140.
- Orman Atlası, (2014). *Orman Atlası*, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Ortega Rodriguez, D. R., & Tomazello-Filho, M. (2019). Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized Pinus taeda trees. *New Forests*, 50(5), 821-843.
- Osuna-Sequera, C., Llana, D. F., Esteban, M., & Arriaga, F. (2019). Improving density estimation in large cross-section timber from existing structures optimizing the number of non-destructive measurements. *Construction and Building materials*, 211, 199-206.

- Ozturk, H., Demir, A., & Demirkir, C. (2022). Optimization of pressing parameters for the best mechanical properties of wood veneer/polystyrene composite plywood using artificial neural network, *European Journal of Wood and Wood Products*, 80, 4, 907-922.
- Özşahin, Ş. (2012). The use of an artificial neural network for modelling the moisture absorption and thickness swelling of oriented strand board. *BioResources* 7, 1053-1067.
- Öztürk H. (2012). *Farklı bölgelerde yetişen sakallı Kızılağaç'dan elde edilen kontrplakların bazı teknolojik özellikleri*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Paridah, M. T., Alia-Syahirah, Y., Hamdan, H., Anwar, U. M. K., Nordahlia, A. S., & Lee, S. H. (2019). Effects of anatomical characteristics and wood density on surface roughness and their relation to surface wettability of hardwood. *Journal of Tropical Forest Science (JTFS)*, 31(3), 269-277.
- Park, H.M., Fushitani, M., Byeon, H.S., & Yang, J.K., (2016). Static bending strength performances of Cross-laminated wood panels made with six species, *Wood and Fiber Science* 48, 2, 1-13.
- Pasternack, R., Wishnie, M., Clarke, C., Wang, Y., Belair, E., Marshall, S., Gu, H., Nepal, P., Dolezal, F., Lomax, G., Johnston, C., Felmer, G., Morelas-Vera, R., Puettmann, M., & Van den Huevel, R. (2022). What is the impact of mass timber utilization on climate and forests?, *Sustainability*, 14, 2, 758.
- Pei, S., Popovski, M., & van de Lindt, J. W. (2013b). Analytical study on seismic force modification factors for cross-laminated timber buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40, 9, 887-896.
- Pei, S., van de Lindt, J. W., & Popovski, M. (2013a). Approximate R-factor for cross-laminated timber walls in multistory buildings, *Journal of Architectural Engineering*, 19, 4, 245-255.
- PFA -Panels and Furniture Asia. (2024 Temmuz 02). *Australian programme to invest \$300 million in mass timber buildings*. <https://panelsfurnitureasia.com/australian-programme-to-invest-300-million-in-mass-timber-buildings/>.
- Pizzi, A., & Mittal, K. L. (2003). *Urea-formaldehyde adhesives*. Handbook of adhesive technology, 2.
- Polastri, A., & Casagrande, D. (2022). Mechanical behaviour of multi-panel cross laminated timber shear-walls with stiff connectors, *Construction and Building Materials*, 332, 127275.
- Pons, O., & Wadel, G., (2011). Environmental impacts of prefabricated school buildings in Catalonia, *Habitat International*. 35, 553–563.
- Popovski, M., & Gavric, I. (2016). Performance of a 2-story CLT house subjected to lateral loads, *Journal of Structural Engineering*, 142, 4, E4015006.

- Popovski, M., Schneider, J., & Schweinsteiger, M., (2010). Lateral load resistance of cross-laminated wood panels, *World Conference on Timber Engineering*, Trentino, Italy.
- Puettmann, M., Bergman, R., Hubbard, S., Johnson, L., Lippke, B., & Oneil, E., (2010). Cradle-to-gate life-cycle inventory of U.S Wood products production: CORRIM phase I And phase II products, *Wood and Fiber Science*, 42, 15–28.
- Puettmann, M., Sinha, A., & Ganguly, I. (2019). Life cycle energy and environmental impacts of cross laminated timber made with coastal Douglas-fir, *Journal of Green Building*, 14, 4: 17–33.
- PULSE. (2006). Analyzers and Solutions, Release 11.2, Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- Puro earth. (2024 Haziran 21). <https://puro.earth/CORC-co2-removal-certificate/bio-based-construction-corcs-from-austria-100159#>.
- Ramos, J.L.F.S., (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*, University of Minho, Doctoral Thesis, Portugal.
- Reynolds, T., Foster, R., Bregulla, J., Chang, W. S., Harris, R., & Ramage, M. (2017). Lateral-load resistance of cross-laminated timber shear walls, *Journal of Structural Engineering*, 143, 12, 06017006.
- Ritter, M. A., Skog, K., & Bergman, R. (2011). Science supporting the economic and environmental benefits of using wood and wood products in green building construction. *General technical report FPL-GTR-206*. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2011: 9 p., 206.
- Ross, R. J., Brashe, B. K., & Pellerin, R. F., (1998). Nondestructive evaluation of wood, *Forest Products Journal*, 48, 14.
- Santoni, A., Schoenwald, S., Van Damme, B., & Fausti, P. (2017). Determination of the elastic and stiffness characteristics of cross-laminated timber plates from flexural wave velocity measurements, *Journal of Sound and Vibration*, 400, 387-401.
- Sathre, R., & González-García, S. (2014). Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials. In *Eco-efficient construction and building materials* pp. 311-337, Woodhead Publishing.
- Satir, E. (2023). *Mechanical Properties of Hybrid Softwood and Hardwood Cross-Laminated Timbers*, Doctoral dissertation, Virginia Tech.
- Schickhofer, G., Brandner, R., & Bauer, H. (2016). Introduction to CLT-product properties-strength classes. In *Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404, Cross laminated timber-a competitive wood product for visionary and fire safe buildings*, Stockholm, 9-32.
- Schneider, J., Stiemer, S. F., Tesfamariam, S., Karacabeyli, E., & Popovski, M. (2012). Damage assessment of cross laminated timber connections subjected to simulated earthquake loads, In *World Conference on Timber Engineering*, 15, 398-406.

- Schwarzmann, G., Hansen, E., & Berger, G. (2018). Cross-laminated timber in North America: What can we learn?, *Bio Products Business*, 81-91.
- Sevim, B., (2010). *Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneyisel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, Türkiye.
- Sharifnia, H., & Hindman, D. P. (2017). Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of southern yellow pine cross laminated timbers, *Construction and Building Materials*, 156, 314-320.
- Shen, Y. L., Schneider, J., Tesfamariam, S., Stiemer, S. F., & Mu, Z. G. (2013). Hysteresis behavior of bracket connection in cross-laminated-timber shear walls, *Construction and Building Materials*, 48, 980-991.
- Shen, Y., Huang, Z., Daneshvar, H., Chui, Y. H., & Huang, D. (2023). Experimental study of CLT panels under combined out-of-plane bending and compression, *Engineering Structures*, 275, 115262.
- Shi, X., Yue, K., Jiao, X., Zhang, Z., & Li, Z. (2022). Experimental investigation into lateral performance of cross-laminated timber shear walls made from fast-growing poplar wood, *Wood Material Science & Engineering*, 1-16.
- Sikora, K. S., McPolin, D. O., & Harte, A. M. (2016). Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear. *Construction and Building Materials*, 116, 141-150.
- Šilinskas, B., Varnagirytė-Kabašinskienė, I., Aleinikovas, M., Beniušienė, L., Aleinikovienė, J., & Škėma, M. (2020). Scots pine and norway spruce wood properties at sites with different stand densities. *Forests*, 11(5), 587.
- Šilinskas, B., Varnagirytė-Kabašinskienė, I., Beniušienė, L., & Aleinikovas, M. (2024). Variations in mechanical wood properties of half-sibling genetic families of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). *Frontiers in Materials*, 11, 1425107.
- Skog, K. E. (2008). Sequestration of carbon in harvested wood products for the United States, *Forest Products Journal*, 58, 56–72.
- Smith, Ryan E., (2011). Interlocking Cross-Laminated Timber: alternative use of waste wood in design and construction, *Paper presented at the BTES Conference 2011 – Convergence And Confluence*, Toronto, Canada.
- Soriano, F. M., Pericot, N. G., & Sierra, E. M. (2016). Comparative analysis of the reinforcement of a traditional wood floor in collective housing, In depth development with cross laminated timber and concrete, *Case studies in construction materials*, 4, 125-145.
- Srivaro, S., Tomad, J., Shi, J., & Cai, J. (2020). Characterization of coconut (*Cocos nucifera*) trunk's properties and evaluation of its suitability to be used as raw material for cross laminated timber production. *Construction and Building Materials*, 254, 119291.

- Steiger, R., Gülzow, A., & Gsell, D. (2008). Non destructive evaluation of elastic material properties of crosslaminated timber (CLT), *In Conference COST E*, 53, pp. 29-30.
- Steiger, R., Gülzow, A., Czaderski, C., Howald, M. T., & Niemz, P. (2012). Comparison of bending stiffness of cross-laminated solid timber derived by modal analysis of full panels and by bending tests of strip-shaped specimens. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1-3), 141-153.
- Stora Enso, (2024, Ekim 29). *Environmental Product Declaration*, <https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/certificates/wood-products-approvals-and-certificates/epd/stora-enso-epd-kvh-2021.pdf>
- StructureCraft. (2019a). Novel laminated timber (NLT)–design and profile guide.
- StructureCraft. (2019b). Dowel laminated timber (DLT)–design and profile guide.
- Subhani, M., Shill, S. K., Al-Deen, S., Anwar-Us-Saadat, M., & Ashraf, M. (2022). Flexural Performance of Splice Connections in Cross-Laminated Timber. *Buildings*, 12(8), 1124.
- Şanıvar, N., & Zorlu, İ. (1982). *Ağaç İşleri Gereç Bilgisi*, Milli Eğitim Gençlik ve Spor Bakanlığı Yayınları, Yayın No: 812, Oğul Matbaacılık.
- Taşpınar, F., & Bozkurt, Z. (2014). Application of artificial neural networks and regression models in the prediction of daily maximum PM10 concentration in Düzce, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 23, 2450-2459.
- Thelandersson, S., & Larsen, H. J. (2003). “*Timber engineering*”, John Wiley & Sons.
- Thinkwood, (2023a, Ekim 14). *Biophilic Design LookBook*, <https://info.thinkwood.com/biophilic-design-lookbook-dl>.
- Thinkwood, (2023b, Ekim 14). *Mass Timber Stands Tall*. <https://www.thinkwood.com/wp-content/uploads/2019/03/Research-Brief-Mass-Timber-2021.pdf>
- Thinkwood, (2023c, Ekim 14). *Mass Timber Design Manual*, <https://info.thinkwood.com/masstimberdesignmanual>,
- Thinkwood, (2023d Ekim 14). *Understanding the Role of Embodied Carbon in Climate Smart Buildings*, <https://www.thinkwood.com/blog/understanding-the-role-of-embodied-carbon-in-climate-smart-buildings>,
- Thomas, R. E., & Buehlmann, U. (2017). Using low-grade hardwoods for CLT production: a yield analysis, *In Proceedings of the 6th international scientific conference on hardwood processing*, pp. 25-28.
- Tiryaki, S., Bardak, S., & Aydın, A. (2016). Modeling of wood bonding strength based on soaking temperature and soaking time by means of artificial neural networks, *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 153-157.

- Tomasi, R., & Smith, I., (2015). Experimental characterization of monotonic and cyclic loading responses of CLT panel-to-foundation angle bracket connections, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27, 6, 04014189.
- Toosi, B. (2011). Cross laminated timber: The market opportunities in North America, *Canada: FP Innovations*, May 12th.
- Totten, S. (2020). *Georgia's mass timber and the triple bottom line*, Southface Institute Blog. <https://www.southface.org/georgias-mass-timber-and-the-triple-bottom-line/>.
- TS 1265. (2019). Kereste - İğne Yapraklı Ağaç Keresteleri - Yapılarda Kullanım İçin. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14081, (2019). Ahşap yapılar-Dikdörtgen kesilmiş yapı kerestelerinin mukavemet sınıflandırması-Bölüm 1:Genel gereklilikler, Türk Standardları Enstitüsü.
- TS EN 16351, (2014). Ahşap yapılar – Çapraz tabakalanmış ahşap levha – Gerekliler, Türk Standardları Enstitüsü.
- TS EN 338, (2016). Yapı kerestesi - Mukavemet sınıfları, Türk Standardları Enstitüsü.
- TS EN 384+A2, (2022). Yapı kerestesi - Mekanik özellikler ve yoğunluğun karakteristik değerlerinin tayini, Türk Standardları Enstitüsü.
- TS EN 408+A1, (2014). Ahşap Yapılar – Yapı Kerestesi ve Tutkallanmış Lamine Kereste – Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Tayini, Türk Standardları Enstitüsü.
- Tureson, J., Berg, S., & Ekevad, M. (2019). Impact of board width on in-plane shear stiffness of cross-laminated timber, *Engineering Structures*, 196, 109249.
- URL-1. (2025, Ocak 21). Buildings: <https://talltimbercenter.com/buildings> adresinden alınmıştır.
- USDA -United States Department of Agriculture. (2022). *Biden Administration Announces \$32 Million to Advance Climate-Smart Mass Timber Construction, Expand Wood Markets*, <https://www.usda.gov/about-usda/news/press-releases/2022/05/27/biden-administration-announces-32-million-advance-climate-smart-mass-timber-construction-expand-wood>.
- Vallely, S., & Schoenwald, S. (2023). An efficient analytical method to obtain the homogenised frequency-independent elastic material properties of cross-laminated timber elements, *Journal of Sound and Vibration*, 546, 117424.
- Varol, T., Canakci, A., & Ozsahin, S. (2018). Prediction of effect of reinforcement content, flake size and flake time on the density and hardness of flake AA2024-SiC nanocomposites using neural networks, *Journal of Alloys and Compounds*, 739, 1005-1014.
- Vloosky, R. P. (2017). International Beams Announces Innovative Wood Products Manufacturing Facility Construction in Dothan, Alabama, *International Beams: Baton Rouge, LA, USA*.

- Wang, Z., Fu, H., Chui, Y. H., & Gong, M. (2014). Feasibility of using poplar as cross layer to fabricate cross-laminated timber, *In Proceedings of the world conference on timber engineering*.
- Waugh, A., (2010). Bigger, taller, better, *Timber Conference*. 18th May. London, England.
- Wells, M. (2011). Tall timber buildings: Applications of solid timber construction in multi-storey buildings, *CTBUH*, 1, 24–26.
- Werner, F., & Richter, K. (2007). Wooden building products in comparative LCA: A literature review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, 470-479.
- Wieruszewski, M., & Mazela, B. (2017). Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Form of Construction Wood, *Drvna Industrija*, 68, 4, 359-367.
- Wilson, J.B., (2005). The Environmental Performance of Renewable Building Materials in the Context of Residential Construction, *CORRIM*, Vol. 37, 155.
- Wood Campus. (2023a, Ekim 24). *Facts about Affordable and Social Housing*, <https://woodcampus.co.uk/affordable-and-social-housing/>.
- Wood Campus. (2023b, Ekim 24). *Facts about health and wellbeing in the built environment*, <https://woodcampus.co.uk/health-and-wellbeing/>.
- World Bank. (2024, Ekim 15). *State and Trends of Carbon Pricing 2021*. Washington, DC: World Bank. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/771941622009013802/state-and-trends-of-carbon-pricing-2021>.
- Xiao, Y., Li, Z., & Wang, R., (2015). Lateral Loading Behaviors of Lightweight Wood-Frame Shear Walls With Ply-Bamboo Sheathing Panels, *Journal of Structural Engineering*, 141, 3, B4014004, 1-9.
- Yadav, V., & Nath, S. (2017), Forecasting of PM 10 Using Autoregressive Models and Exponential Smoothing Technique, *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 14, 4, 109-113
- Yaltırak, F., & Efe, A. (1994). *Dendroloji Ders Kitabı*, İstanbul: İ.Ü. Orman Fakültesi Yayınları, Yayın No: 3836/431.
- Yeh, B., Kretschmann, D., & Wang, B. J. (2013). *Manufacturing Cross-laminated timber manufacturing*. In: CLT handbook: cross-laminated timber/edited by Erol Karacabeyli, Brad Douglas.--US ed. 2013; 34 p., (2), 1-34.
- Yusoh, A. S., Tahir, P. M., Uyup, M. K. A., Lee, S. H., Husain, H., & Khaidzir, M. O. (2021). Effect of wood species, clamping pressure and glue spread rate on the bonding properties of cross-laminated timber (CLT) manufactured from tropical hardwoods. *Construction and Building Materials*, 273, 121721.

- Zhang, L., Tiemann, A., Zhang, T., Gauthier, T., Hsu, K., Mahamid, M., ... & Ozevin, D. (2021). Nondestructive assessment of cross-laminated timber using non-contact transverse vibration and ultrasonic testing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79, 335-347.
- Zhou, J., Yue, K., Lu, W., Chen, Z., Cheng, X., Liu, W., Jia C. & Tang, L. (2017). Bonding performance of melamine-urea-formaldehyde and phenol-resorcinol-formaldehyde adhesives in interior grade glulam. *Journal of adhesion science and Technology*, 31(23), 2630-2639.
- Zhou, Q., Gong, M., Chui, Y. H., & Mohammad, M. (2014). Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce. *Construction and Building Materials*, 64, 379-386.
- Zhu, E., Chen, Z., Chen, Y., & Yan, X., (2010). Testing and FE Modeling of Lateral Resistance of Shear Walls in Light Wood Frame Structures, *Journal of Harbin Institute of Technology*, 42, 10, 1548–1554.

## ÖZGEÇMİŞ

Abdullah Uğur BİRİNCİ, ilköğrenimini Yüzüncü Yıl İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2007 yılında Yunus Emre Lisesi'nde tamamladı. 2007-2008 öğretim yılında Ordu Üniversitesi/Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu/İnşaat bölümünde ön lisans eğitime başladı. 2010 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği bölümünde lisans eğitime başladı. 2015 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2019 yılında “Karadeniz bölgesi yerli ağaç türlerinden çapraz lamine ahşap (CLT) üretimi ve optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi” başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından doktora eğitime başladı. 2018 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. İyi derece İngilizce bilmektedir.