



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

**BAZI AĞAÇ TÜRLERİNİN KESME MODÜLLERİNİN
ULTRASONİK VE STATİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ**

MURAT AYDIN

**DOKTORA TEZİ
KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

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

DÜZCE, 2018

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAZI AĞAÇ TÜRLERİNİN KESME MODÜLLERİNİN
ULTRASONİK VE STATİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Murat AYDIN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

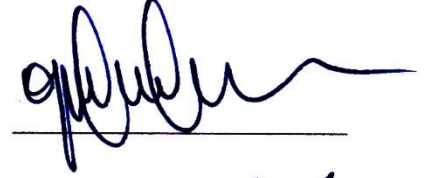
Yrd. Doç. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. K. Hüseyin KOÇ
İstanbul Üniversitesi



Doç. Dr. Uğur GÜVENÇ
Düzce Üniversitesi



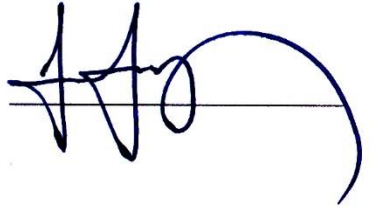
Yrd. Doç. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU
Düzce Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. A. Cemil İLÇE
Abant İzzet Baysal Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. Suat AYAN
Düzce Üniversitesi



Tez Savunma Tarihi: 14/02/2018

BEYAN

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

14 Şubat 2018

Murat AYDIN

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımlarından dolayı danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez çalışmamda her türlü destek ve yardımlarından dolayı TİK üyelerim Yrd. Doç. Dr. A. Cemil İLÇE ve Yrd. Doç. Dr. Suat AYAN'a ve jüri üyem Doç. Dr. Uğur GÜVENÇ'e teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimimde emeği olan jüri üyem Prof. Dr. K. Hüseyin KOÇ'a teşekkür ederim.

Yardımlarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Dr. Tuğba Yılmaz AYDIN'a ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamdaki yardımlarından dolayı Prof. Dr. Raquel GONÇALVES, Dr. José XAVIER ve diğer tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2016.07.01.501 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir. Tez çalışmam süresince bana imkan sunan T.C. Süleyman Demirel Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

14 Şubat 2018

Murat AYDIN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ	IX
ÇİZELGE LİSTESİ	XII
KISALTMALAR	XV
SİMGELER	XVII
ÖZET	XIX
ABSTRACT	XXI
EXTENDED ABSTRACT	XXIII
1. GİRİŞ	1
1.1. AĞAÇ MALZEME	4
1.1.1. Ağaç Malzemenin Elastik Özellikleri	5
1.1.1.1. <i>Kesme Gerilmeleri</i>	7
1.1.1.2. <i>Elastikiyet Modülü</i>	7
1.1.1.3. <i>Poisson Oranı</i>	8
1.1.2. Ağaç Malzemenin Direnç Özellikleri	9
1.1.2.1. <i>Çekme Direnci</i>	9
1.1.2.2. <i>Basma Direnci</i>	9
1.1.2.3. <i>Eğilme Direnci</i>	10
1.1.2.4. <i>Şok (Dinamik Eğilme) Direnci</i>	10
1.1.2.5. <i>Torsiyon Direnci</i>	10
1.1.2.6. <i>Kesme Direnci</i>	11
1.1.2.7. <i>Aşınma Direnci</i>	12
1.1.3. Ağaç Malzemenin Mekanik Davranışını Etkileyen Doğal Faktörler	12
1.1.3.1. <i>Yoğunluk</i>	12
1.1.3.2. <i>Budaklar</i>	13
1.1.3.3. <i>Lif Kıvrıklığı Ve Lif Düzensizliği</i>	13
1.1.3.4. <i>Yıllık Halka Yönü</i>	13
1.1.3.5. <i>Reaksiyon Odunu</i>	14

1.1.3.6. Genç Odun	14
1.1.3.7. Yetiştirme Süresince Maruz Kalınan Doğal Basma Yükleri.....	14
1.1.3.8. Reçine Keseleri	14
1.1.3.9. Ekstraktifler	15
1.1.4. Ağaç Malzemenin Mekanik Davranışını Etkileyen Çevresel Faktörler	15
1.1.4.1. Rutubet.....	15
1.1.4.2. Sıcaklık.....	17
1.1.4.3. Kimyasallara Maruz Kalma Ve Kimyasal İşlemler	19
1.1.4.4. Yaşlandırma	19
1.1.4.5. Nükleer Radyasyon	20
1.1.4.6. Küf Ve Mantarlar.....	21
1.1.4.7. Çürüklük.....	21
1.1.4.8. Bakteri Ve Böcek Zararlıları	21
1.1.5. Ağaç Malzemenin Mekanik Davranışını Etkileyen Zamana Bağlı Faktörler	22
1.1.5.1. Yükleme Süresi Ve Hızı	22
1.1.5.2. Sünme.....	22
1.1.5.3. Yorulma.....	23
1.2. MALZEME MUAYENESİ	24
1.2.1. Tahribatsız (Dinamik) Muayene	24
1.2.1.1. Ultrasonik Muayene.....	27
1.2.1.2. Sıvı Emdirme.....	32
1.2.1.3. Manyetik Parçacık	33
1.2.1.4. Radyografi	34
1.2.1.5. Girdap Akımları.....	34
1.2.1.6. Gözle Muayene	34
1.2.2. Tahribatlı (Statik) Muayene	35
1.3. LİTERATÜR ÖZETİ	35
2. MATERYAL VE YÖNTEM	67
2.1. MALZEME	67
2.1.1. Kızılçam (Pinus brutia Ten.)	67
2.1.1.1. Makroskobik Ve Mikroskobik Özellikler.....	68
2.1.1.2. Fiziksel Ve Mekanik Özellikler	68

2.1.2. Karaçam (<i>Pinus nigra</i> Arnold.)	70
2.1.2.1. <i>Makroskobik Ve Mikroskobik Özellikler</i>	70
2.1.2.2. <i>Fiziksel Ve Mekanik Özellikler</i>	71
2.1.3. Sarıçam (<i>Pinus silvestris</i> L.)	71
2.1.3.1. <i>Makroskobik Ve Mikroskobik Özellikler</i>	72
2.1.3.2. <i>Fiziksel Ve Mekanik Özellikler</i>	73
2.2. YÖNTEM	74
2.2.1. Test Örneklerinin Hazırlanması	74
2.2.1.1. <i>Tahribatsız Test Örneklerinin Hazırlanması</i>	74
2.2.1.2. <i>Tahribatlı Test Örneklerinin Hazırlanması</i>	76
2.2.2. Örneklerin Kondisyonlanması	77
2.2.3. Örnek Yoğunluklarının Belirlenmesi	78
2.2.4. Rutubet Tayini	78
2.2.5. Kesme Modülünün Belirlenmesi	79
2.2.5.1. <i>Tahribatsız (Dinamik) Muayene – Ultrasonik Test</i>	79
2.2.5.2. <i>Tahribatlı Muayene - Statik Test</i>	82
2.2.6. Kesme Gerilme Sınırının Belirlenmesi	84
2.2.7. Efektif Frekans	85
2.2.8. Dalga Boyu	85
2.2.9. Yakın Alan	86
2.2.10. Yayılım Uzunluğu İle Dalga Boyu Arasındaki İlişki	87
2.2.11. Sonlu Elemanlar Analizi	87
2.2.12. Verilerin Değerlendirilmesi	89
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	90
3.1. FİZİKSEL ÖZELLİKLER	90
3.2. KESME GERİLME SINIRI	97
3.3. KESME MODÜLÜ	106
3.4. ULTRASONİK ÖLÇÜM BULGULARI	143
3.4.1. <i>Ultrasonik Dalga Hızı</i>	144
3.4.2. <i>Efektif Frekans</i>	162
3.4.3. <i>Dalga Boyu</i>	164
3.4.4. <i>Yayılım Uzunluğu İle Dalga Boyu Arasındaki İlişki</i>	166
3.4.5. <i>Yakın Alan</i>	168

3.5. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ BULGULARI	169
3.5.1. Karaçamın Lineer Ortotropik Davranışı	169
3.5.2. Kızılçamın Lineer Ortotropik Davranışı.....	175
3.5.3. Sarıçamın Lineer Ortotropik Davranışı.....	181
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	187
5. KAYNAKLAR.....	191
ÖZGEÇMİŞ	223



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Odunda kesme türleri [17].	2
Şekil 1.2. Kontrplağın eğilmesi sırasında meydana gelen rolling shear [19].	3
Şekil 1.3. Gerilme-şekil değiştirme diyagramı [31].	6
Şekil 1.4. Kesme gerilmesi ve malzeme geometrisindeki açısal değişim [34].	7
Şekil 1.5. Poisson oranında yatay ve dikey yönde şekil değiştirme durumu [37].	8
Şekil 1.6. Torsiyon testi konfigürasyonu [39].	11
Şekil 1.7. Rutubete bağlı meydana gelen direnç değişimleri.	17
Şekil 1.8. Sünme davranışı [92].	23
Şekil 1.9. Ses dalgalarının yaklaşık frekans spektrumu ve bazı uygulamalar.	28
Şekil 1.10. Boyuna ve enine dalgaların yayılım özelliği [108].	29
Şekil 1.11. Kusur olması veya olmamasındaki darbe-yankı yansımaları [116].	30
Şekil 1.12. CATIA V5 ile modellemede odun parametreleri.	37
Şekil 1.13. Ceviz odununun rutubete bağlı kesme modülü [192].	43
Şekil 1.14. Sekiz nod izoparametrik SE modeli.	44
Şekil 1.15. Sıcaklık ve rutubetin kayın odunu kesme modülüne etkisi.	50
Şekil 1.16. Anizotropinin kesme dalgası hızı üzerine etkisi.	54
Şekil 1.17. Kesme dalgası hızı ile sensör açısı değişimi arasındaki ilişki.	55
Şekil 1.18. Lamina kesme modülünün açığa bağlı değişimi.	56
Şekil 1.19. Cansu [123]'ya ait ultrasonik test örnekleri.	58
Şekil 1.20. Ağaç malzeme mukavemetinin rutubet ile değişimi [354].	60
Şekil 1.21. Blok kesme yöntemine göre hazırlanan örnekler.	63
Şekil 1.22. Kızılçam kontrplak çekme-makaslama direnci.	65
Şekil 1.23. Liflere dik, paralel ve açılı kesme gerilmeleri.	66
Şekil 2.1. Test örneklerinin hazırlanışı.	74
Şekil 2.2. Tomrukların biçilme şekli ve test örneklerinin elde edilmesi.	75
Şekil 2.3. 65mm'lik küplerin polihedral geometriye dönüşümünün kenar bağıntısı.	76
Şekil 2.4. 26 yüzeyli tahribatsız test örneğinin hazırlanma aşamaları.	76
Şekil 2.5. Eksen dışı basma örneğinin hazırlanışı.	77
Şekil 2.6. LR, LT ve RT eksen dışı basma örneklerinin üç kesitinin görünüşü.	77
Şekil 2.7. Tahribatsız test örneklerinin ağırlık ve hacim ölçümü.	78
Şekil 2.8. Kesme dalgası transdüseri (a) ve EPOCH 650 Ultrasonik hata dedektörü (b).	81
Şekil 2.9. SWC jel kullanılarak gerçekleştirilen ultrasonik ölçüm.	82
Şekil 2.10. Kızılçam 45° eksen dışı basma testi örneği.	82
Şekil 2.11. Epsilon marka bi-aksiyal ekstensometre.	83
Şekil 2.12. Ekstensometreden alınan yatay ve dikey gerilme-şekil değiştirme verileri.	83
Şekil 2.13. Sariçam LT basma örneğinin kesmede akma noktasının belirlenmesi.	84
Şekil 2.14. Efektif frekansın belirlenmesi [143].	85
Şekil 2.15. Yakın alan ve uzak alan yayılımı [420].	86
Şekil 2.16. LR (XY) 45 (alt) , LT (XZ) 45 (sağ üst) ve RT (YZ) 45 (sol üst) eksen dışı basma örnek modelleri.	88

Şekil 2.17. Solid 45, üç boyutlu yapısal element [201].	88
Şekil 3.1. Statik test örneklerinin bağıl nem ve rutubet içeriği arasındaki ilişki.	90
Şekil 3.2. Dinamik test örneklerinin bağıl nem ve rutubet içeriği arasındaki ilişkisi.....	91
Şekil 3.3. Statik test örneklerinin bağıl nem ve yoğunluğu arasındaki ilişki.....	91
Şekil 3.4. Dinamik test örneklerinin bağıl nem ve yoğunluğu arasındaki ilişki.	92
Şekil 3.5. Kızılcım kesmede gerilme sınırının bağıl neme göre değişimi.	97
Şekil 3.6. Karaçam kesme gerilme sınırının bağıl neme göre değişimi.	101
Şekil 3.7. Sarıçam kesme gerilme sınırının bağıl neme göre değişimi.	104
Şekil 3.8. Kızılcım odununun statik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi.	108
Şekil 3.9. Kızılcım odununun dinamik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi..	112
Şekil 3.10. Kızılcım statik G_{LR} ve dinamik G_{LR} arasındaki belirleme katsayısı.....	115
Şekil 3.11. Kızılcım statik G_{LT} ve dinamik G_{LT} arasındaki belirleme katsayısı.	116
Şekil 3.12. Kızılcım statik G_{RT} ve dinamik G_{RT} arasındaki belirleme katsayısı.....	116
Şekil 3.13. Karaçam odununun statik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi. ...	118
Şekil 3.14. Karaçam odununun dinamik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi.	122
Şekil 3.15. Karaçam statik G_{LR} ve dinamik G_{LR} arasındaki belirleme katsayısı.	125
Şekil 3.16. Karaçam statik G_{LT} ve dinamik G_{LT} arasındaki belirleme katsayısı.	126
Şekil 3.17. Karaçam statik G_{RT} ve dinamik G_{RT} arasındaki belirleme katsayısı.	126
Şekil 3.18. Sarıçam odununun statik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi.....	128
Şekil 3.19. Sarıçam odununun dinamik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi. 132	
Şekil 3.20. Sarıçam statik G_{LR} ve dinamik G_{LR} arasındaki belirleme katsayısı.	135
Şekil 3.21. Sarıçam statik G_{LT} ve dinamik G_{LT} arasındaki belirleme katsayısı.	135
Şekil 3.22. Sarıçam statik G_{RT} ve dinamik G_{RT} arasındaki belirleme katsayısı.	136
Şekil 3.23. Kesmenin RT kesitli ladin (a) ve kiraz (b) odunu hücre yapısında oluşturduğu deformasyonlar [105].	136
Şekil 3.24. Simetrik üçlü nokta [424].	138
Şekil 3.25. Mikrofibril açısının kesme modülüne etkisi.	141
Şekil 3.26. Odundaki düzensizlik ve katılık durumu.	143
Şekil 3.27. Kızılcım odununun dalga hızları ve bağıl neme göre değişimi.	146
Şekil 3.28. Karaçam odununun dalga hızları ve bağıl neme göre değişimi.....	150
Şekil 3.29. Sarıçam odununun dalga hızları ve bağıl neme göre değişimi.	154
Şekil 3.30. Odunun hücre yapısı [460].	157
Şekil 3.31. Karaçam LR45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.	169
Şekil 3.32. Karaçam eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.	170
Şekil 3.33. Karaçam eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.	170
Şekil 3.34. Karaçam LT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.	171
Şekil 3.35. Karaçam eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.	172
Şekil 3.36. Karaçam eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.	172
Şekil 3.37. Karaçam RT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.....	173
Şekil 3.38. Karaçam eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.	174
Şekil 3.39. Karaçam eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.	174
Şekil 3.40. Kızılcım LR45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.....	175
Şekil 3.41. Kızılcımın eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve	

SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.....	176
Şekil 3.42. Kızılçamın eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.....	176
Şekil 3.43. Kızılçam LT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.....	177
Şekil 3.44. Kızılçamın eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.....	178
Şekil 3.45. Kızılçamın eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.....	178
Şekil 3.46. Kızılçam RT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.....	179
Şekil 3.47. Kızılçamın eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.....	180
Şekil 3.48. Kızılçamın eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.....	180
Şekil 3.49. Sarıçam LR45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.....	181
Şekil 3.50. Sarıçam eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.....	182
Şekil 3.51. Sarıçam eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.....	182
Şekil 3.52. Sarıçam LT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.....	183
Şekil 3.53. Sarıçam eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.....	184
Şekil 3.54. Sarıçam eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.....	184
Şekil 3.55. Sarıçam RT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.....	185
Şekil 3.56. Sarıçam eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.....	186
Şekil 3.57. Sarıçam eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.....	186

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Çeşitli rutubet içeriğine göre kesme katsayılarının değişimi.....	16
Çizelge 1.2. Odun ürünlerin tahribatsız değerlendirmesinde fırsat ve gereklilikler.....	25
Çizelge 1.3. Odunun tahribatsız sınıflandırma yöntemleri.....	26
Çizelge 1.4. Odunun tahribatsız testinde kullanılan yöntemler.....	27
Çizelge 1.5. Bazı odun türlerinin kesme modülleri.....	38
Çizelge 1.6. Bazı ağaç türlerinin liflere paralel kesme dirençleri.....	61
Çizelge 1.7. Hava kurusu örneklerde çekme-kesme değerleri.....	62
Çizelge 1.8. Kesme direncine göre ağaç türlerinin sınıflandırılması.....	62
Çizelge 1.9. Blok kesme testi ile elde edilen kesme direnç değerleri.....	63
Çizelge 1.10. Kesme direnci değerleri.....	63
Çizelge 1.11. Kızılçam kontrplak çekme-kesme direnci.....	64
Çizelge 2.1. Kızılçam odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.....	69
Çizelge 2.2. Antalya ve Burdur yöresi kızılçamının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	70
Çizelge 2.3. Karaçam odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.....	71
Çizelge 2.4. Sarıçam odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.....	73
Çizelge 2.5. Modellemede kullanılan malzeme parametreleri.....	89
Çizelge 3.1. Kızılçam statik test örneklerinin fiziksel özelliklerine ait bulgular.....	93
Çizelge 3.2. Karaçam statik test örneklerinin fiziksel özelliklerine ait bulgular.....	94
Çizelge 3.3. Sarıçam statik test örneklerinin fiziksel özelliklerine ait bulgular.....	95
Çizelge 3.4. Dinamik test örneklerinin fiziksel özelliklerine ait bulgular.....	96
Çizelge 3.5. Kızılçam statik LR kesme gerilme sınırı varyans analizi.....	98
Çizelge 3.6. Kızılçam statik LR kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.....	98
Çizelge 3.7. Kızılçam statik LT kesme gerilme sınırı varyans analizi.....	99
Çizelge 3.8. Kızılçam statik LT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.....	99
Çizelge 3.9. Kızılçam statik RT kesme gerilme sınırı varyans analizi.....	100
Çizelge 3.10. Kızılçam statik RT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.....	100
Çizelge 3.11. Karaçam statik LR kesme gerilme sınırının varyans analizi.....	101
Çizelge 3.12. Karaçam statik LR kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.....	102
Çizelge 3.13. Karaçam statik LT kesme gerilme sınırının varyans analizi.....	102
Çizelge 3.14. Karaçam statik LT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.....	102
Çizelge 3.15. Karaçam statik RT kesme gerilme sınırının varyans analizi.....	103
Çizelge 3.16. Karaçam statik RT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.....	103
Çizelge 3.17. Sarıçam statik LR kesme gerilme sınırının varyans analizi.....	104
Çizelge 3.18. Sarıçam statik LR kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.....	105
Çizelge 3.19. Sarıçam statik LT kesme gerilme sınırının varyans analizi.....	105
Çizelge 3.20. Sarıçam statik LT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.....	105
Çizelge 3.21. Sarıçam statik RT kesme gerilme sınırının varyans analizi.....	106
Çizelge 3.22. Sarıçam statik RT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.....	106
Çizelge 3.23. Kızılçam statik G_{LR} , G_{LT} ve G_{RT} 'sinin bulguları.....	107
Çizelge 3.24. Kızılçam odunu statik G_{LR} 'sinin varyans analizi.....	108
Çizelge 3.25. Kızılçam statik G_{LR} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.....	109
Çizelge 3.26. Kızılçam odunu statik G_{LT} 'sinin varyans analizi.....	109

Çizelge 3.27. Kızılcım statik GLT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	110
Çizelge 3.28. Kızılcım odunu statik GRT 'sinin varyans analizi.	110
Çizelge 3.29. Kızılcım statik GRT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	111
Çizelge 3.30. Kızılcım dinamik GLR , GLT ve GRT 'sinin bulguları.	111
Çizelge 3.31. Kızılcım odunu dinamik GLR 'sinin varyans analizi.	112
Çizelge 3.32. Kızılcım dinamik GLR 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	113
Çizelge 3.33. Kızılcım odunu dinamik GLT 'sinin varyans analizi.	113
Çizelge 3.34. Kızılcım dinamik GLT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	114
Çizelge 3.35. Kızılcım odunu dinamik GRT 'sinin varyans analizi.	114
Çizelge 3.36. Kızılcım dinamik GRT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	115
Çizelge 3.37. Karaçam statik GLR , GLT ve GRT 'sinin bulguları.	117
Çizelge 3.38. Karaçam odunun statik GLR 'sinin varyans analizi.	118
Çizelge 3.39. Karaçam statik GLR 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	119
Çizelge 3.40. Karaçam odunu statik GLT 'sinin varyans analizi.	119
Çizelge 3.41. Karaçam statik GLT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	120
Çizelge 3.42. Karaçam odunu statik GRT 'sinin varyans analizi.	120
Çizelge 3.43. Karaçam statik GRT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	120
Çizelge 3.44. Karaçam dinamik GLR , GLT ve GRT 'sinin bulguları.	121
Çizelge 3.45. Karaçam odunu dinamik GLR 'sinin varyans analizi.	122
Çizelge 3.46. Karaçam dinamik GLR 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	123
Çizelge 3.47. Karaçam odunu dinamik GLT 'sinin varyans analizi.	123
Çizelge 3.48. Karaçam dinamik GLT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	124
Çizelge 3.49. Karaçam odunu dinamik GRT 'sinin varyans analizi.	124
Çizelge 3.50. Karaçam dinamik GRT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	125
Çizelge 3.51. Sariçam statik GLR , GLT ve GRT 'sinin bulguları.	127
Çizelge 3.52. Sariçam odunu statik GLR 'sinin varyans analizi.	128
Çizelge 3.53. Sariçam statik GLR 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	129
Çizelge 3.54. Sariçam odunu statik GLT 'sinin varyans analizi.	129
Çizelge 3.55. Sariçam statik GLT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	130
Çizelge 3.56. Sariçam odunu statik GRT 'sinin varyans analizi.	130
Çizelge 3.57. Sariçam statik GRT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	130
Çizelge 3.58. Sariçam dinamik GLR , GLT ve GRT 'sinin bulguları.	131
Çizelge 3.59. Sariçam odunu dinamik GLR 'sinin varyans analizi.	132
Çizelge 3.60. Sariçam dinamik GLR 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	133
Çizelge 3.61. Sariçam odunu dinamik GLT 'sinin varyans analizi.	133
Çizelge 3.62. Sariçam dinamik GLT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	133
Çizelge 3.63. Sariçam odunu dinamik GRT 'sinin varyans analizi.	134
Çizelge 3.64. Sariçam dinamik GRT 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	134
Çizelge 3.65. Kızılcım odunu VL_R , VL_T ve VR_T 'sinin bulguları.	145
Çizelge 3.66. Kızılcım odunu VL_R 'sinin varyans analizi.	146
Çizelge 3.67. Kızılcım odunu VL_R 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	147
Çizelge 3.68. Kızılcım odunu VL_T 'sinin varyans analizi.	147
Çizelge 3.69. Kızılcım odunu VL_T 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	148
Çizelge 3.70. Kızılcım odunu VR_T 'sinin varyans analizi.	148
Çizelge 3.71. Kızılcım odunu VR_T 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	148
Çizelge 3.72. Karaçam odunu VL_R , VL_T ve VR_T 'sinin bulguları.	149
Çizelge 3.73. Karaçam odunu VL_R 'sinin varyans analizi.	150
Çizelge 3.74. Karaçam odunu VL_R 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	151
Çizelge 3.75. Karaçam odunu VL_T 'sinin varyans analizi.	151
Çizelge 3.76. Karaçam odunu VL_T 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	151

Çizelge 3.77. Karaçam odunu V_{RT} 'sinin varyans analizi.	152
Çizelge 3.78. Karaçam odunu V_{RT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	152
Çizelge 3.79. Sarıçam odunu V_{LR} , V_{LT} ve V_{RT} 'sinin bulguları.	153
Çizelge 3.80. Sarıçam odunu V_{LR} 'sinin varyans analizi.	154
Çizelge 3.81. Sarıçam odunu V_{LR} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	155
Çizelge 3.82. Sarıçam odunu V_{LT} 'sinin varyans analizi.	155
Çizelge 3.83. Sarıçam odunu V_{LT} 'sinin bağıl nem göre homojenlik grupları.	155
Çizelge 3.84. Sarıçam odunu V_{RT} 'sinin varyans analizi.	156
Çizelge 3.85. Sarıçam odunu V_{RT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.	156
Çizelge 3.86. Kızıлчаam odununda hesaplanan efektif frekanslar.	163
Çizelge 3.87. Karaçam odununda hesaplanan efektif frekanslar.	163
Çizelge 3.88. Sarıçam odununda hesaplanan efektif frekanslar.	163
Çizelge 3.89. Kızıлчаam odunu yönlere ve bağıl neme bağlı dalga boyları.	165
Çizelge 3.90. Karaçam odunu yönlere ve bağıl neme bağlı dalga boyları.	165
Çizelge 3.91. Sarıçam odunu yönlere ve bağıl neme bağlı dalga boyları.	166
Çizelge 3.92. Kızıлчаam odununda yayılım uzunluğu ile dalga boyu ilişkisi.	166
Çizelge 3.93. Karaçam odununda yayılım uzunluğu ile dalga boyu ilişkisi.	167
Çizelge 3.94. Sarıçam odununda yayılım uzunluğu ile dalga boyu ilişkisi.	167
Çizelge 3.95. Kızıлчаam odunu yakın alan değerleri.	168
Çizelge 3.96. Karaçam odununun yakın alan değerleri.	168
Çizelge 3.97. Sarıçam odununun yakın alan değerleri.	169
Çizelge 3.98. Karaçam LR45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.	169
Çizelge 3.99. Karaçam LT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.	171
Çizelge 3.100. Karaçam RT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.	173
Çizelge 3.101. Kızıлчаam LR45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.	175
Çizelge 3.102. Kızıлчаam LT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.	177
Çizelge 3.103. Kızıлчаam RT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.	179
Çizelge 3.104. Sarıçam LR45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.	181
Çizelge 3.105. Sarıçam LT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.	183
Çizelge 3.106. Sarıçam RT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.	185

KISALTMALAR

Ar-Ge	Araştırma Geliştirme
ASTM	American Society for Testing and Materials
BT	Bilgisayarlı Tomografi
CCD	Charge Coupled Device (Yüklenme iliştirilmiş Cihaz)
COK	Cam Elyaf Odun Kırılması
CT	Compression Test (Basma Testi)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
df	Degree of freedom (Serbestlik Derecesi)
DG	Duncan Grubu
DIN	Deutsches Institut für Normung (Alman Standardizasyon Enstitüsü)
DRM	Denge Rutubet Miktarı
DSM	Digital Strain Meter (Dijital Gerilme Ölçücü)
DUS	Dalga Uçuş Süresi
EF	Efektif Frekans
EN	European Norm
ESPI	Elektronic Speckle Pattern Interferometry
F	Force (Kuvvet)
F	Frequency (Frekans)
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
FF	Fenol Formaldehit
FS	Fiber Saturation (Lif Doygunluğu-LD)
HG	Homojenlik Grubu
ISO	International Standardization Organization (Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu)
LDN	Lif Doygunluğu Noktası
LVL	Laminated Veneer Lumber (Lamine Kaplama Ahşap)
MC	Moisture Content (Rutubet İçeriği)
MDF	Medium Density Fibreboard (Orta Yoğunluklu Liflevha)
MoE	Modulus of Elasticity (Elastikiyet Modülü)
MoR	Modulus of Rupture (Eğilme Direnci)
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora (Brezilya Ulusal Standard Organizasyonu)
NF	Near Field (Yakın Alan)
NDT	Non-destructive testing (Tahribatsız muayene)
NMR	Nuclear Magnetic Resonance (Nükleer Manyetik Rezonans)
OK	Odun kırılması
OSB	Oriented Strand Board (Yönlendirilmiş Yonga Levha)
RH	Relative humidity (Bağıl Nem)
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SWC	Shear Wave Couplant (Kesme Dalgası Temas Maddesi)

TOF	Time of Flight (Uçuş Süresi)
TS	Türk Standardı
USA	United States of America (Amerika Birleşik Devletleri)
ÜF	Üreformatdehit
YSP	Yield Stress Point (Akma Gerilmesi Noktası)
WY	Wayoming



SİMGELER

C_{ii}	Gevşeklik matrisinin diyagonal terimleri
C_{ij}	Gevşeklik matrisinin diyagonal olmayan terimleri
D_0	Density (Tam Kuru Yoğunluk)
\cos	Cosinus (Kosinus)
D_{12}	Density (Hava Kuru Yoğunluk)
d_{th}	İlgili bağıl nem yoğunluğu
E	Young's modülü
f	Dalga frekasını
G_{ij}	Kesme modülü
Hz	Hertz
kHz	Kilo hertz
k_H	Regresyon modeli ile elde edilen düzeltme faktörü
k_n	Regresyon modeli ile elde edilen düzeltme faktörü
L	Dalga boyu ile dalga yayılım uzunluğu arasındaki ilişki
M_0	Tam kuru örnek ağırlığı
m_r	Örnek ağırlığı
MHz	Mega hertz
n_1	$\cos \alpha$
n_2	$\sin \alpha$
P_{max}	Maksimum yük
r^2	r kare (Belirleme katsayısı)
S	Shear (Kesme ya da makaslama modülü)
V	Velocity (Dalga yayılım hızı)
V_{ij}	İJ yönündeki ultrasonik dalga hızı
V_α	Alfa açısındaki ultrasonik dalga hızı
$V[\%]$	Varyasyon katsayısı
V_r	Örnek hacmi
V_{sat}	Saturasyon noktasındaki ultrasonik ses hızı
V_{12}	Denge rutubetindeki (%12) ultrasonik dalga hızı
V_H	LDN altı ya da üstü MC'de ölçülen ultrasonik dalga hızı
ν_{ij}	İJ doğrultusundaki Poisson oranı
μ	Mikro
μm	Mikro milim
σ_M	Makaslama (kesme) direnci
$\sigma_{y'}$	Ortalama yatay gerilme
δ_r	Yoğunluk
ρ	Yoğunluk
ϕ	Bağıl nem
ω	Rutubet içeriği
\bar{x}	Ortalama
Δx	Delta iks (Toplam yer değiştirme)
$^\circ$	Derece
$^\circ C$	Derece santigrat

%	Yüzde
ρ_{ap}	Denge rutubetindeki odun yoğunluğu
λ	Lambda (Dalga boyu)
λ_{ij}	İJ doğrultusunda ilerleyen kesme dalgasının dalga boyu
ϕ	Ultrasonik ölçümlerde kullanılan transdüser çapı
α	Alfa
$\varepsilon_{y'}$	Ortalama yatay şekil değiştirme
τ	Kesme gerilmesi



ÖZET

BAZI AĞAÇ TÜRLERİNİN KESME MODÜLLERİNİN ULTRASONİK VE STATİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Murat AYDIN

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU

Şubat 2018, 222 sayfa

Bu çalışmada, ibreli ağaç türlerinden olan kızılçam, karaçam ve sarıçam odunlarında elastik özelliklerinden biri olan kesme modülü, statik ve dinamik yöntemler ile belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan ağaçlar, Türkiye’de yetişen asli ağaç türlerinin alansal dağılımı bakımından ilk üç sırada yer aldığı ve ağaç işleri endüstrisinde sıkça kullanıldığı için tercih edilmiştir. Kızılçam ve karaçam tomruklar Isparta’dan, sarıçam tomruklar ise Bolu’dan temin edilmiştir. Tomruklar Isparta’da biçirilmiş ve denge rutubetine kadar kurutulmuştur. Kurumuş kerestelerden, tahribatlı ve tahribatsız test örnekleri hazırlanmıştır. Rutubetin kesme modülüne etkisini belirlemek için test örnekleri, $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve %45, 65, 75 ve 85 bağıl nem koşullarında dört farklı grup oluşturacak şekilde iklimlendirilmiştir. İklimlendirme sonrası örnek yoğunlukları TS2472’ye göre belirlenmiştir. Sonrasında 1MHz frekanslı yayılım yapan kesme dalgası transdüser ve Olympus EPOCH 650 ultrasonik hata detektörü ile tahribatsız ölçümler gerçekleştirilmiş ve ilgili eşitlikler yardımı ile dinamik kesme modülleri belirlenmiştir. Tahribatsız testlerde 26 yüzeyle polihedral geometriye sahip örnekler kullanılmıştır. Bu örnekler ile elastik matrisinin tüm terimleri, tek bir örnek üzerinden belirlenebilmektedir ve bu çalışmada da matrisin diyagonal terimleri olan kesme modülleri elde edilmiştir. Tahribatlı testlerde ise 45° eksen dışı basma testi uygulanmıştır. Basma testi, 5 tonluk yük hücreli universal test makinası ile gerçekleştirilmiştir. Basma esnasında meydana gelen gerilme-şekil değiştirme verileri Epsilon bi-aksiyal ekstensometre ile elde edilmiştir. Bu veriler, ilgili eşitlikler aracılığı ile statik kesme modülü belirlenmesinde kullanılmıştır. Dinamik ve statik kesme modüllerinin belirlenmesinde elde edilen veriler MS Office ve IBM SPSS v20 yazılımları ile istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve grafik ve tablo olarak verilmiştir. Çalışma sonucunda dinamik kesme modülü değerleri ile statik kesme modülü değerleri en fazla %15,18 fark ile belirlenmiştir. En yüksek fark sarıçam odununun %85 bağıl nemdeki LT düzleminde belirlenmiştir. Literatürde dinamik yöntemle belirlenen elastik özelliklerin statik yöntemle belirlenenden fazla olduğu ve genellikle bu farkın %20’ye kadar olduğu belirtilse de bazı çalışmalarda bu fark %40’lar civarında da olabilmektedir. Elde edilen bu değerler neticesinde kızılçam, karaçam ve sarıçam’ın literatürde eksik olan rutubete bağlı kesme modülü değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, ultrasonik yöntemin bu değerleri tahmin etmede gerçeğe yakın değerler verdiği de istatistiksel olarak ortaya konulmuştur.

Dolayısı ile ultrasonik ölçümlerin yapısal tasarımlarda kesme davranışının ultrasonik yöntem ile malzemeye zarar vermeden yerinde yapılabilmesi mevcut yapıların sağlamlığı ve sağlıklı olup olmadığını belirlemek adına fayda sağlayabilecektir. Bunun yanında statik yöntemle belirlenen kızılçam, karaçam ve sarıçam kesme modülleri ve yoğunluk değerleri kullanılarak eksen dışı basma örneklerinin Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) yapılmış ve modellerin gerilme-şekil değiştirme davranışı ortaya konulmuştur. SEA için gerekli olan diğer elastik sabitler (Young's modülleri ve Poisson oranarı) literatürden elde edilmiştir. Statik testlerden elde edilen yük deformasyon eğrileri, gerilme-şekil değiştirme eğrilerine dönüştürülmüş ve SEA ile elde edilen gerilme-şekil değiştirme doğruları ile karşılaştırılmıştır. SEA sonuçlarının statik test sonuçları ile uyumluluk gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Elastik sabit, Kesme modülü, Tahribatsız muayene, Ultrasonik.



ABSTRACT

DETERMINATION OF SHEAR MODULUS OF SOME WOOD SPECIES USING ULTRASONIC AND STATIC TEST METHODS

Murat AYDIN

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Composite Material
Technologies

Doctoral Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU

February 2018, 222 pages

In this study, shear modulus of Calabria pine, Black pine and Scots pine wood, one of the elastic constants of wood material, were determined using static and dynamic test methods. Tree species are native to Turkey and in the top tree according to area coverage. Also they are commonly used in woodworking industry. Because of these reasons these species were chosen. Calabria pine and Black pine logs were obtained from Isparta while Scots pine logs were obtained from Bolu. All logs were sawn into timber in Isparta and dried till the Equilibrium Moisture Content (EMC). Destructive and non-destructive test samples were prepared using dried timber. All the samples were acclimatized at constant temperature at $20\pm 1^\circ\text{C}$ and 45%, 65%, 75% and 85% relative humidity (RH) conditions in a climate chamber to determine the effect of moisture content (MC) on shear modulus. Densities of the samples were determined according to TS2472 standard. Non-destructive measurements performed using Olympus EPOCH 650 ultrasonic flaw detector and shear transducer that propagates 1MHz frequency. Dynamic shear moduli were calculated by related formulas using obtained time of flight values. 26 surface polyhedral samples used to perform non-destructive tests. All terms of elasticity matrix can be obtained on only one sample which has this type of geometry and shear moduli which are the diagonal terms of this matrix obtained in this study. Destructive test were conducted by off-axis compression test. Universal test machine with 5 tons load cell was used to perform compression test. Stress-strain values were obtained using bi-axial extensometer while performing compression test. Static shear moduli were calculated using these stress-strain values using related formulas. Obtained values that used to predict and calculate the dynamic and static shear moduli were statistically analyzed using IBM SPSS v20 and MS Office software used to create tables and graphs that present the results. Maximum 15.18% difference between static and dynamic shear values obtained at the end of study. Maximum difference was calculated for LT plane shear modulus of Scots pine wood which acclimatized at 85% RH. According to the literature, dynamic shear modulus values are generally higher than static ones and difference between dynamic and static shear modulus is generally about 20% but this difference can reach up to 40% in some cases. According to results, moisture dependent shear moduli of Calabria pine, Black pine and Scots pine wood, which were not in the literature, determined and it is proved that

ultrasonic measurement is applicable to predict these values by reasonable differences. Consequently, it can be said that, ultrasonic measurements provide some contributions to predict shear behaviour of structures or structural designs without any destruction to ensure whether they are safe or not. Furthermore, Finite Element Analysis (FEA) of off-axis compression samples performed using density and shear moduli values of Black pine, Calabria pine and Scots pine that determined by static method. And then load-deformation behavior of models proved. Other elastic constants, Young's moduli and Poisson ratios, required for FEA were obtained from the literature. Load-deformation curves that obtained by static tests transformed into stress-strain curves and they compared with the stress-strain lines that obtained by FEA. And, it's determined that FEA results fairly agreed with the static test results.

Keywords: Elastic constant, Shear modulus, Non-destructive testing, Ultrasonic.



EXTENDED ABSTRACT

DETERMINATION OF SHEAR MODULUS OF SOME WOOD SPECIES USING ULTRASONIC AND STATIC TEST METHODS

Murat AYDIN
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Composite Material
Technologies
Doctoral Thesis
Supervisor: Assist. Prof. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU
February 2018, 222 pages

1. INTRODUCTION

Wood is a complex structured composite consists of cellulose microfibrils that embedded in lignin and hemicellulose resin matrix [1]. Wood is a natural composite [2] and natural composites such as wood grow or form naturally [3]–[6]. Chemical composition of this natural composite consist of celulose, lignin, hemicelulose and extractives [4], [5]. Celulose and lignin act as a matrix to gather selulose fibrils together to form composite structure [7].

Wood has polar orthotropic nature due to its cylindrical form. Due to its complex nature, less-known elastic constants of wood must be defined to evaluate real-like behavior of wood under real conditions or loading. Elastic constant consist of 12 parameters which are Young's moduli (E_L , E_R , E_T), shear modulus (G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}) and Poisson ratio (μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TR} , μ_{LT} μ_{TL}). These parameters explain the elastic behavior of wood at a 3D macroscopic level [8]–[11].

And, in the letrature there are limited studies concerned with moisture dependent shear modulus or behaviour of wood. There is no knowledge either about shear modulus or moisture dependent shear modulus especially for Calabrian pine, Black pine and Scots pine that are the native species of Turkey. From this point of view, this study aimed to determine moisture dependent shear modulus of these species both static and dynamic test methods. Beside, Finite Element (FE) model of off-axis compression samples created

using ANSYS. And, static stress-strain curves that obtained by of off-axis compression test compared with Finite Element Analysis (FEA) results.

2. MATERIAL AND METHODS

Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.), Black pine (*Pinus nigra* Arnold.) and Scots pine (*Pinus silvestris* L.) were used in the study. Calabrian pine logs, 4m long, were harvested from Beşkonak village in Bucak county that located in Southwest of Turkey. Black pine logs, 5m long, were harvested from Sütçüler county of Isparta city that located in Southwest of Turkey. Scots pine logs were obtained from Aladağ forestry department of Bolu city that located in North-west of Turkey. All the logs have cylindrical form and starigh fibers, were free of defects such as decay, reaction wood, eccentric formation or else.

All the logs were sawn in timber and dried till the Equilibrium Moisture Content (EMC). Defect free test samples were prepared according to TS2470 [12] standard. Non-destructive test (NDT) samples prepared as polihedral geometry which consist of 26 surface that paralel to each other. Dimension of the NDT samples were 64x64x64mm. Polihedral geometry allowed us to perfom ultrasonic measurement not only along the all principles axes of anisotropy but off-axis. Thus, all the elastic constant of test samples could be obtained from one samle. Destructive test sapmles were prepared as 45° off-axis of principal axes L, R and T. Dimension of the test samples was almost 20x20x60mm.

All the test samples were conditioned in a chamber that operates at 45, 65, 75, and 85% Relative Humidity (RH) and a constant temperature of 20 ± 1 C°. Weigh of the test samples was controlled regularly and climatization ended when all the samples reach a constant weigh.

At the end of the acclimatization, density of the test sapmles were determined according to TS2472 [13] standard. Stereo-metric method, based on volume and mass measurement of the sample, was used to determine samples densities. Densities were calcultaed using formula (2.2) with measuered weigh and volume data.

Mositure Content (MC) of the test samples were calculated according to TS2471 [14] standard. Weigh of the test samples were measured at the end of the climatization and before performing the test. After the tests, samples were dried in an oven that operates 103 ± 2 °C till they reach the constant weigh. Then, weigh of the samples measured using a precision scales. MC of the samples was calculated using formula (2.3) with weigh

values that measured before the tests and after the drying processes.

Dynamic shear moduli were determined using ultrasonic non-destructive testing. Six shear wave velocities (V_{LR} , V_{LT} , V_{RL} , V_{RT} , V_{TL} and V_{TR}), along the principles axes of anisotropy, were measured by EPOCH 650 ultrasonic flaw detector (compliance with EN12668-1 [15]) with using Panametrics-NDTTM V153 shear wave transducers. Olympus shear wave gel (Chemtec, Waltham, USA) medium used to minimize the noise of transmitted and received radio frequency which propagates at 1 MHz. Also this ensured coupling of specimens and transducers while measurements performed. Transducers are pressured to specimens by a small pressure applied by hand. The tests were performed under standard climatic conditions (65%Rh, 20 ± 1 C°). Obtained shear wave velocities and calculated density values used in formula 2.9, 2.10 and 2.11 to calculate dynamic shear modulus.

Static shear modulus calculated using linear elastic regime of stress-strain curves that obtained by bi-axial extensometer while performing off-axis (45°) compression tests. Universal test machine with 5 ton load capacity was used to conduct compression tests. Static shear moduli were calculated with stress and strain values using formula 2.16.

Shear yield stress values were calculated by %0.2 offsetting the linear elastic regime line. Also effective frequency, wave length and near field properties of 1MHz shear wave calculated.

ANSYS software used to created 3D off-axis (45°) LR, LT and RT compression FE models and FEA. Solid 45 element and density and linear orthotropic material properties (elastic constants) used for analysis. FEA results compared with the static stress-strain results and presented as figures.

MS Office and SPSS v20 software used to analyse obtained values and these were presented as tables and figures.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

At the end of the tests, the following results were obtained.

Densities of the entire test samples increased when RH rose from 45% to 85%. In similar manner, MC of all the test samples rose when RH rose from 45% to 85%. These values presented in Çizelge 3.1 to Çizelge 3.4.

According to these results average densities of the Calabrian pine dynamic test samples

were 0.545, 0.558, 0.567, and 0.569g/cm³ for 45, 65, 75 and 85%RH, respectively. Black pine dynamic test samples average densities were 0.520, 0.541, 0.552, and 0.570g/cm³ for 45, 65, 75 and 85%RH, respectively. And, Scots pine dynamic test samples average densities were 0.546, 0.552, 0.557, and 0.560g/cm³ for 45, 65, 75 and 85%RH, respectively. Moisture content of the dynamic test samples at 45, 65, 75 and 85%RH were 8.16, 12.66, 15.81, and 17.91% for Calabrian pine, 7.93, 12.4, 14.69, and 16.51% for Black pine, and 7.94, 13.04, 14.34, and 16.37 for Scots pine, respectively.

Average densities of the static test samples were varied for the LR, LT, and RT off-axis test samples. Calabrian pine RT, LT, and LR test samples densities from 45%RH to 85%RH raised from 0.534 to 0.545, 0.495 to 0.512, 0.526 to 0.558g/cm³, respectively. Black pine RT, LT, and LR test samples densities from 45%RH to 85%RH raised from 0.534 to 0.563, 0.516 to 0.567, 0.530 to 0.563g/cm³, respectively. Scots pine RT, LT, and LR test samples densities from 45%RH to 85%RH raised from 0.534 to 0.549, 0.508 to 0.532, 0.512 to 0.547g/cm³, respectively. And, moisture content of the Calabrian pine at 45, 65, 75 and 85% RH level were 9.35, 12.92, 15.14, and 19.21 for RT test samples, 9.18, 12.73, 15.59, and 19.05% for LT test samples, and 9.33, 12.71, 15.09, and 19.11% for LR test samples, respectively. Moisture content of the Black pine at 45, 65, 75 and 85% RH level calculated as 8.7, 12.56, 14.8, and 18.46 for RT test samples, 8.92, 12.45, 14.33, and 19.57% for LT test samples, and 8.85, 12.57, 14.49, and 18.38% for LR test samples, respectively. Moisture content of the Scots pine at 45, 65, 75 and 85% RH level were 9.19, 12.68, 15.52, and 19.28 for RT test samples, 8.8, 12.62, 14.85, and 19.24% for LT test samples, and 9.12, 12.53, 15.33, and 19.69% for LR test samples, respectively.

According to results, static shear modulus of the Calabrian pine wood at 45, 65, 75, and 85% RH levels were obtained as 1054, 999, 959, and 932N/mm² for LR, 904, 858, 840, and 825 N/mm² for LT, and 230, 218, 214, and 210 N/mm² for RT planes, respectively.

According to results, dynamic shear modulus of the Calabrian pine at 45, 65, 75, and 85% RH levels were obtained as 1140, 1107, 1081, and 1064N/mm² for LR, 981, 952, 924, and 909N/mm² for LT, and 253, 247, 240, and 234N/mm² for RT planes, respectively.

According to results, static shear modulus of the Black pine wood at 45, 65, 75, and 85% RH levels were obtained as 1028, 965, 941, and 925N/mm² for LR, 764, 698, 673, and 660N/mm² for LT, and 162, 150, 143, 138N/mm² for RT planes, respectively.

According to results, dynamic shear modulus of the Black pine wood at 45, 65, 75, and

85% RH levels were obtained as 1079, 1025, 1015, and 1008N/mm² for LR, 807, 755, 749, and 741N/mm² for LT, and 175, 166, 161, and 158N/mm² for RT planes, respectively.

According to results, static shear modulus of the Scots pine wood at 45, 65, 75, and 85% RH levels were obtained as 965, 890, 856, and 844N/mm² for LR, 914, 843, 809, and 784N/mm² for LT, and 182, 169, 161, and 154N/mm² for RT planes, respectively.

According to results, dynamic shear modulus of the Scots pine wood at 45, 65, 75, and 85% RH levels were obtained as 988, 954, 939, and 927N/mm² for LR, 953, 922, 916, and 903N/mm² for LT, and 189, 183, 180, and 176N/mm² for RT planes, respectively.

When static and dynamic shear moduli were compared it's found that there were reasonable differences between them. According to results, differences between dynamic and static shear modulus of Calabrian pine wood at 45, 65, 75, and 85% RH levels were calculated as 10.24, 13.07, 12.13, and 11.6% for RT, 8.51, 10.96, 10.07, and 10.17 for LT, and 8.22, 10.85, 12.75, and 14.18 for LR planes, respectively.

According to results, differences between dynamic and static shear modulus of Black pine wood at 45, 65, 75, and 85% RH levels were calculated as 8.25, 10.8, 12.99, and 14.5% for RT, 5.56, 8.15, 11.26, and 12.24 for LT, and 4.89, 6.23, 7.92, and 8.99 for LR planes, respectively.

According to results, differences between dynamic and static shear modulus of Scots pine wood at 45, 65, 75, and 85% RH levels were calculated as 4.21, 8.51, 11.75, and 14.22% for RT, 4.3, 9.31, 13.18, and 15.18 for LT, and 2.32, 7.24, 9.72, and 9.84 for LR planes, respectively.

According to results, calculated maximum difference was 15.18% (for LT shear modulus of Scots pine at 85% RH) and ultrasonic prediction of the shear moduli of these wood species reasonable when it's considered the expression that Dackermann et al. [16] stated as ultrasonic measurements overestimates shear modulus and these value is around 20%.

According to these results it's found that shear moduli of Calabrian pine, Black pine and Scots pine woods were affected by MC. shear modulus of wood decreased when moisture content of the wood increased. There are limited studies concerned with shear modulus of the wood material. Because shear modulus determination is a complex processes and in general it's not possible to obtain pure shear modulus values. But, developing technologies such as ultrasonic testing allow researchers to approximately estimate these

values. Moisture dependent shear modulus of Calabrian pine, Black pine and Scots pine not studied yet. And due to these reason discussion was done with a limited literature.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

In this study, moisture dependent shear moduli of Calabria pine, Black pine and Scots pine woods, which were not available in the literature, were determined by off-axis compression test (CT) and NDT using ultrasonic shear wave propagation. Both static and dynamic shear modulus values (for all directions or planes) negatively affected by the moisture content. When determining the dynamic shear moduli, it's expected to be obtaining comparatively higher velocities when tested material quality is good in terms of defects, density, uniformity, homogeneity and etc. But as well-known, wood is a natural composite material and has some inhomogeneity in its structures such as knot, slope of grain, extractives, resin and resin ducts, fiber orientation or angle, annual ring, and etc. And, ultrasonic testing of wood is not as easy as other homogeneous material due to these effecting parameters.

It was found that shear wave velocities negatively affected by moisture content but no significant relation observed between density and shear wave velocities. But in general higher density means higher velocity for lots of materials. Shear wave velocities decreased with increase of MC. It is occurred due to increase of water molecules in wood and accordingly wave absorbed much more.

Result of this study showed that shear modulus of Calabria pine, Black pine and Scots pine woods can be estimated close enough to static values using ultrasonic testing.

Also, moisture dependent shear moduli values can be used to perform computer aided analysis such as finite element methods. This can be assumed as another contribution of this study to literature. And, it's determined that FEA results agreed with the static test results at a reasonable level. And it can be said that differences may be occurred due to used Young's moduli and Poisson ratios values that obtained from the literature.

1. GİRİŞ

Ağaç malzeme yeryüzünde doğal olarak yetişen ve yenilenebilir bir kaynaktır. Yaşam için gerekli olan barınma, ısınma vb. ihtiyaçlar yüzyıllar boyunca ağaç malzeme ile sağlanmıştır. Günümüzde gelişen teknoloji ve değişen yaşam biçimlerine bağlı olarak ağaç malzemenin kullanım yeri ve şekli değişikliğe uğramıştır. Artan nüfus gereksinimleri, tüketim hızı (kullanım ömrü, moda algısı vb.) ve kullanım koşulları giderek artan malzeme ihtiyacını da doğurmuştur. Yenilenebilir olmayan cevherler, bu ihtiyacı belirli bir süre boyunca karşılayabilir. Yenilenebilir ahşap malzeme ise bu bakımdan mühendislik faaliyetleri sonrasında ihtiyaçları karşılayacak özellikler kazandırılarak sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilir.

Sürdürülebilirlik doğanın kendini yenilemesine de fırsat sunmaktır. Ağaç malzeme her ne kadar yenilenebilir olsa da tüketimin üretimle denk olması gereklidir. Tüketimde ürün yaşam döngüsü ne kadar uzun ise o kadar az yeni üretim, zararlı salınım ve enerji tüketimi olacaktır. Ahşap malzeme yapısı gereği korunmaya muhtaçtır ve koruma yapılmadığı takdirde ağaç cinsi ve kullanım koşullarına bağlı olarak deforme olup kullanılamaz hale gelecektir. Bu da doğrudan ürün yaşam döngüsünü kısaltan bir sonuç doğurmaktadır. Bilhassa yapısal ahşaplarda yaşam döngüsü daha önemlidir zira yük karşısında zamana bağlı olarak yorulma gerçekleşecektir. Bu yorulma kritik yük noktasında telafisi zor sonuçlar doğurabilir. Bu yük zaman ilişkisi kullanılan ağaç malzemenin cinsi, uygulanan yük, konstrüksiyon, çevre koşulları gibi etkenlere bağlı olarak değişkenlik gösterecektir. Bu durumda ağaç malzemenin mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekli hesapların yapılmasını sağlayacaktır. Bu özelliklerin bilinmesi, bilgisayar destekli yazılımlar ile mühendislik analizlerinin ve benzetimlerin yapılmasını ve dolayısı ile daha güvenli yapıların inşa edilebilmesini sağlayacaktır. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) buna verilebilecek en iyi örneklerdendir. Kullanılan malzemeye ait bazı sabitlerin bilinmesi koşuluyla Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile gerek zaman gerek işgücü gerekse de maliyetten tasarruf edilip bu analizler gerçekleştirilebilmektedir.

Ağaç malzemeye ait elastik sabitler, günümüzde mühendisliğin tüm dallarında yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar analizi gibi uygulama ve modellemelerin yapılabilmesi için gereklidir. Ağaç malzemenin elastik davranışını belirleyen bu

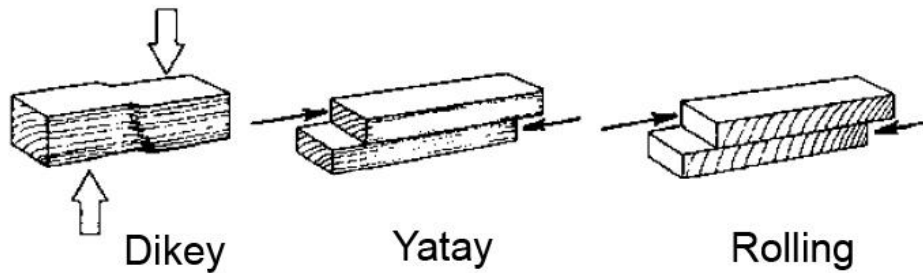
sabitler, elastikiyet (Young's) modülü (E_L, E_R, E_T), kesme modülü (G_{LR}, G_{LT}, G_{RT}) ve Poisson oranı ($\nu_{LR}, \nu_{RL}, \nu_{RT}, \nu_{TR}, \nu_{LT}$ ve ν_{TL}) olmak üzere 12 parametreden oluşur.

İzotropik malzemelerdeki elastik sabitler, tüm yönlerde aynıdır fakat doğal kompozit olan odun, ortotropik bir yapıya sahiptir ve odunun elastik davranışını belirleyebilmek için üç yöndeki kesme modülünü de içeren elastik sabitlerin bilinmesi gerekir. Kesme modülü, kesme gerilmesinin kesme şekil değiştirmesiyle olan bağıntısıdır [17]. Düşük gerilmeler altında malzeme davranışı genellikle linear elastik olur. Lineer elastik sınırlar içerisinde gerilme ile şekil değiştirme orantılıdır ve şekil değişimleri kalıcı değildir. Hooke kuralı bu davranışı detaylı bir şekilde açıklamaktadır. Denklem (1.1)'de görüldüğü üzere kesme gerilmesi (τ) ile kesme şekil değiştirmesi (γ) lineer elastik davranış gösteren malzemelerde orantılıdır. G ile ifade edilen orantı katsayısına da kesme modülü denir. Fakat gerilmelerin orantılılık sınırını aşması durumunda Hooke kuralı kullanılamaz ve malzeme bu sınırın üstündeki gerilmelerde doğrusal olmayan davranış sergiler [18]. Odun da bu sınırın üzerindeki gerilmelerde doğrusal olmayan davranış sergileyen malzemelerdendir. Odunun temel eksenleri olan L, R ve T, kesme modülünde LR (longitudinal-radyal), LT (longitudinal-teğet) ve RT (radyal-teğet) düzlemleriyle ifade edilir. Dolayısı ile G_{LR} , LR düzlemindeki kesme şekil değiştirmesi ve LT ve RT düzlemlerindeki kesme gerilmesine bağlı olarak meydana gelir [17].

$$\tau = G\gamma \quad (1.1)$$

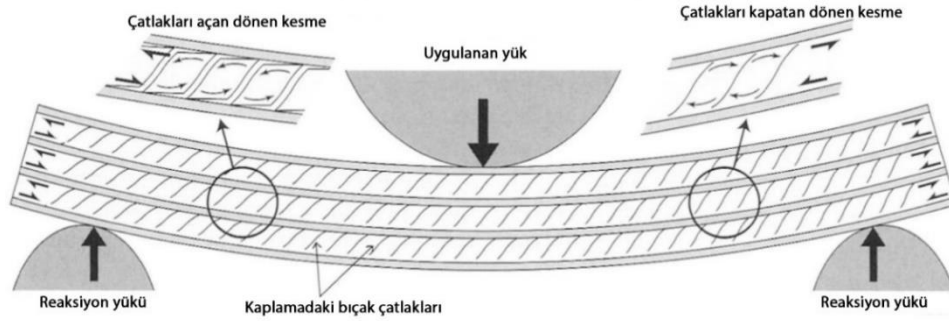
Burada; τ kesme gerilmesi ve $G\gamma$ kesme şekil değiştirmesini ifade etmektedir.

Odun malzemedeki Şekil 1.1'de görüldüğü gibi dikey, yatay ve Rolling olmak üzere üç farklı kesme davranışı vardır. Dikey kesme davranışı odunun hücre duvarlarının bozulmasından önce meydana gelir. Çoğunlukla odundaki en önemli kesme davranışı liflere paralel olan yatay kesmedir ve hücreler arası bağları yıkan ve hücre duvar yapısını deforme eden bir davranış sergiler [17].



Şekil 1.1. Odunda kesme türleri [17].

Rolling shear ise yatay ve dikey davranışın haricinde yuvarlanma eğilimi ile meydana gelen ve görece olarak daha az öneme sahip bir kesme davranışıdır. Şekil 1.2’de üç nokta eğilme testi uygulanmış bir kontrplağın eğilme davranışı esnasında meydana gelen Rolling shear etkisi görülmektedir.



Şekil 1.2. Kontrplağın eğilmesi sırasında meydana gelen rolling shear [19].

Kesme modülü ile kesme direnci birbirinden farklı özellikler olup birbirlerine karıştırılabilmektedir. Kesme modülü ya da diğer adı ile rijitlik modülü, ağaç malzemenin elastik özelliği ve kesme gerilmesinin malzemede meydana getirdiği deformasyona (defleksiyona) karşı direncini belirtirken [20] kesme direnci direnç özelliklerindedir. Kesme (makaslama) direnci, yan yana ve birbiri ile kaynaşmış olan iki düzlemi birbirine zıt yönde kaydırarak birbirinden ayırmaya çalışan kuvvetlere karşı gelme gücüdür [21]. Odun, boyuna hücrelerinin yapısı ve dizilimleri nedeni ile liflere dik kesmeye karşı oldukça dayanıklıdır. Bunun yanında liflere paralel kesme direnci ise büyük ışınlar ve ilkbahar ve yaz odunu iştirak oranı gibi odunun anatomik özelliklerinden ciddi biçimde etkilenir [19]. Kesme direnci, denklem (1.2) ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_M = P_{max} / b * L \text{ (daN / cm}^2\text{)} \quad (1.2)$$

Burada; P max maksimum yükü (daN veya kP), b örneğin genişliğini (cm) ve L kesme yüzeyi uzunluğunu (cm) ifade etmektedir.

Gerilmenin şekil değiştirmeye oranı olan kesme (makaslama) modülü ise denklem (1.3) ile hesaplanmaktadır.

$$S = (F/A) / (\Delta x / L) = F * L / A * \Delta x \text{ (Pascals)} \quad (1.3)$$

Bu eşitlikte; S kesme modülünü, F uygulanan kuvveti, L örnek boyunu, A örnek enine kesit alanını ve Δx toplam yer değiştirmeyi ifade etmektedir.

Geri döndürülemez malzeme deformasyonlarının önüne geçilebilmesi, kullanım yerindeki çevre koşullarının bu deformasyonlara etkisinin belirlenebilmesi ve ürün ya da parçanın gerçek koşullar altındaki işlevselliğinin ve yaşam ömrünün güvence altına alınabilmesi için malzemenin elastik özelliklerini bilmek gerekir. Ülkemiz asli ağaç türlerinin ortotropik elastik özellikleri hakkında çalışmalar sınırlıdır. Gerçekleştirilen çalışmalarla genellikle üç yöndeki elastikiyet modülü ve Poisson oranları belirlenmiş iken kesme modülü hakkında çok fazla veriye rastlanmamaktadır. Diğer çalışmalar ise genellikle odunun direnç özelliklerine odaklanmıştır. Dolayısı ile bu çalışma, ibrelî türler olan kızılçam, karaçam ve sarıçam ağaç malzemenin on iki elastik sabitlerinden üçü olan kesme modüllerinin statik (eksen dışı basma) ve dinamik (ultrasonik) yöntemler ile belirlenmesini ve ultrasonik yöntemin statik yöntemin yerine kullanılabilir olup olmadığını ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Ross [22]'a göre ahşap malzemenin mekanik özellikleri üzerine etki eden en önemli çevresel faktörlerden biri de rutubettir. Kızılçam, karaçam ve sarıçamında aralarında olduğu birçok asli odun türümüzün rutubete bağlı ortotropik elastik özellikleri literatürde eksiktir. Dolayısı ile rutubetin kızılçam, karaçam ve sarıçam odunu ortotropik kesme modüllerine etkisinin belirlenmesi bu çalışmanın bir diğer amacıdır.

Bilgisayar destekli analiz yazılımları, gelişen teknolojiyle modellerin mekanik davranışını gerçeğe yakın olarak ortaya koyabilmektedir. Elde edilen kesme modülleri kullanılarak SEA ile kızılçam, karaçam ve sarıçam odunlarının ortotropik mekanik davranışının karşılaştırmalı olarak ortaya konulması da literatürdeki bir diğer eksikliği giderecektir.

Bu doğrultuda çalışmanın ilk bölümünde kullanılan ağaç malzeme ve tahribatsız muayene hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde ise kapsamlı bir literatür özeti yapılmıştır. Üçüncü bölümde materyal ve metod açıklanmıştır. Dördüncü bölümde bulgulara yer verilmiş ve sonraki bölümlerde bulgular literatürle karşılaştırılarak tartışılmış ve sonuç ve öneriler ortaya konulmuştur.

1.1. AĞAÇ MALZEME

İngilizce 'wood' kelimesi Türkçe odun, tahta, kereste, ağaç kelimelerinin karşılığıdır [23]. Odun, ağaçların ve diğer odunsu bitkilerin kök ve gövdesinde bulunan gözenekli ve lifli yapısal dokuya denir. Bu lifli yapı, sert olup ağacın ya da bitkinin gövde ya da

dallarını oluşturan temel bileşendir.

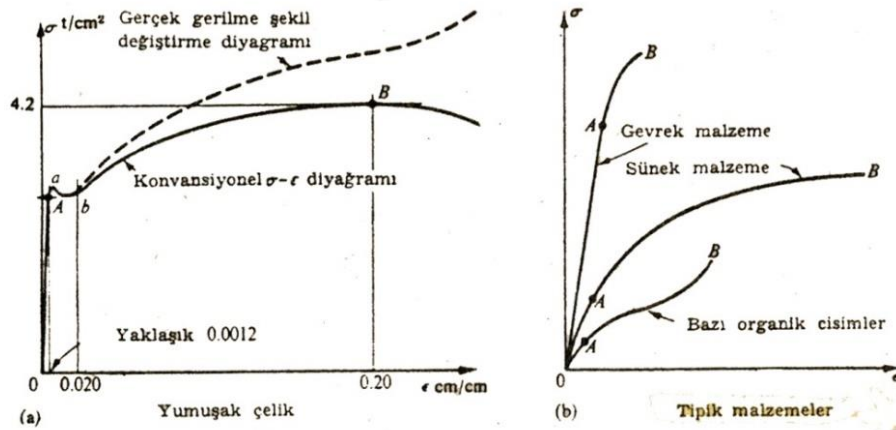
Odun, lignin ve hemiselüloz reçine matrisine gömülü selüloz mikrofibrillerinden oluşan karmaşık yapıya sahip bir kompozittir [1]. Birçok doğal malzeme gibi odun da kompozit bir malzemedir [2]. Bu malzemelerin bazıları odun gibi doğal olarak yetişen ya da doğal süreçlerle geliştirilen [3] doğal kompozitlerdir [3]–[6]. Bu doğal kompozitin kimyasal bileşimi selüloz, lignin, hemiselüloz ve ekstraktiflerden oluşur [4], [5]. Burada hemiselüloz ve lignin, matris olarak selüloz liflerini kompozit bir malzeme olarak bir arada tutar [7]. Royal Society of Chemistry [24]’ye göre uzun selüloz lifleri (polimer) daha zayıf bir cisim olan lignin tarafından bir arada tutulur. Sağlam ve esnek selüloz lifleri ve bunları bir arada tutan lignin ve diğer polimerler ağaç malzemenin mekanik özelliklerini de belirler. Bu özellikler anizotropik olup ağaç türlerine bağlı olarak büyük değişkenlik gösterir [25]. Dinçkal [26]’a göre odunun elastik sabitleri arasındaki bağımlı yanında elastik anizotropi derecesi odundan üretilen herhangi bir ürün ya da mühendislik tasarımında hayati önem taşır. Ağaç malzemenin kesme modülü de elastik davranışı belirleyen en önemli mekanik özelliklerdendir. Simpson ve TenWolde [27]’ye göre odunun fiziksel ve mekanik özellikleri yoğun bir şekilde malzemenin temel yönlerine ve yapısına (anatomi, hücre duvarı makro moleküler düzen gibi) bağlıdır.

Doğal ve mühendislik işlemleri sonrasında yapısal, dekoratif veya enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan ağaç malzeme, yenilenebilir önemli bir kaynak türüdür. Odunun da içinde bulunduğu doğal lif kompozitleri, havacılık, otomotiv ve diğer alanlarda konstrüktif parça imalatında kullanılmaktadır [28]. Ahşap, en eski [29] ve ilk yapı malzemelerinden biridir [30]. Kullanım yeri ve amacına göre fiziksel, mekanik, estetik ve ekonomik kaygılar temelinde farklı türde ve farklı işleme özelliklerine sahip ağaç malzeme tercih edilir. Buradaki tercih rasyonel bir biçimde yapılmalıdır. Yapılan bilimsel çalışmalar rasyonel tercihlerin artması adına gereklidir. Dolayısıyla rasyonel tercihler, ürün özellikleri ve diğer etkenler bilindiğinde yapılabilir.

1.1.1. Ağaç Malzemenin Elastik Özellikleri

Elastiklik, bir cisme uygulanan yükün kaldırılmasıyla cisimde kalıcı deformasyonun olmayışı, yani cismin yük öncesi haline dönmesi olarak yorumlanabilir. Ağaç malzemenin mekanik özellikleri, elastik ve direnç olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu iki özellik arasındaki fark Şekil 1.3’de görülen gerilme-şekil değiştirme diyagramı ile daha açık biçimde anlaşılmaktadır. Elastik özellikler, A ile belirtilen sınıra kadar

görülmekte iken direnç özellikleri B ile belirtilen ve kırılmanın olduğu son nokta ile gösterilmektedir. A noktasına kadar meydana gelen gerilme-şekil değiştirme bağıntısı doğrusal olarak kabul edilir ve bu, Hooke kanununun temelini teşkil ederek bu kanunun orantılılık sınırı içinde kullanılabilmesini sağlar. Ayrıca büyük şekil değiştirmelere mukavemet edebilen malzemeler sünek (yumuşak) iken mukavemet edemeyenlere gevrek malzemeler denir. Şekil 1.3 (a)'da görülen ab hattı ise akma noktası ile adlandırılır ve sabit bir gerilim altında bu hat üzerinde büyük deformasyonlar gözlenirken gevrek malzemelerde akma olayı meydana gelmez [31].



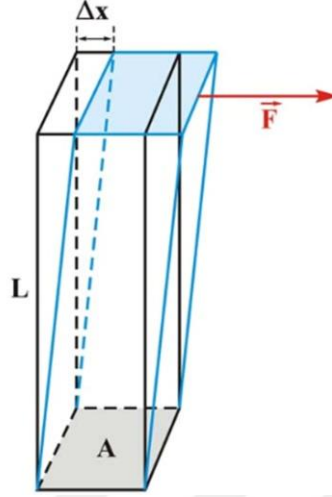
Şekil 1.3. Gerilme-şekil değiştirme diyagramı [31].

Ağaç malzemenin elastik özellikleri, kesme gerilmeleri ya da modülü, elastikiyet modülü ve Poisson oranı olmak üzere üç temelde açıklanır. Bunlar elastik sabitler olarak da ifade edilmekte ve Kretschmann [32]'a göre türe, rutubet içeriğine ve yoğunluğa göre farklılıklar göstermektedir.

Kesme modülü, genellikle kesme direnci ile karıştırılabilmektedir. Kesme modülü, bir malzemenin yük altında deformasyona karşı gösterdiği mukavemeti ve bu yükün ortadan kalkması ile malzemenin ilk ölçülerine ya da orijinal şekline dönebilme yetisi de denebilecek malzemenin elastik davranışını belirleyen elastik özelliklerden biridir. Orijinal şekle ve ölçülere geri dönebilme oransallık (elastik) sınırlar içerisinde yükün kaldırılması sonucunda meydana gelebilir. Fakat ağaç malzeme yapısından dolayı tam olarak elastik sayılamaz zira visko-elastik bir malzeme olarak kabul görür. Kesme direnci ise malzemenin direnç özelliklerindedir ve malzemeye uygulanabilecek nihai (en yüksek) yüke karşı koyduğu mukavemet değerini belirtir. Bu nihai yük dayanımı sonrasında malzemede kopma, kırılma vb. geri dönüşü olmayan hasarlar meydana gelir. Bu durum Şekil 1.3'de görüldüğü gibi plastik bölge sonunda meydana gelir.

1.1.1.1. Kesme Gerilmeleri

Kesme ya da kayma, aynı yük türü için dış basınçlardır; çekme ve basınçtan yön bakımından farklılık gösterirler. Bu durumda meydana gelen teğetsel gerilmeler malzeme geometrisinde Şekil 1.4’de görüldüğü gibi açı değişimlerine neden olur [33].



Şekil 1.4. Kesme gerilmesi ve malzeme geometrisindeki açısal değişim [34].

Şekil 1.4’deki gibi bir objenin A ile gösterilen enine kesit alanı sabit tutulur ve buna paralel alana F ile gösterilen kuvvet uygulanırsa bu alan Δx kadar yer değiştirecektir. Bu durumda kesme gerilmesi denklem (1.4) yardımı ile hesaplanır.

$$\tau = F / A \quad (1.4)$$

Burada; τ kesme gerilmesi (N/mm^2), F cisme uygulanan kuvvet (N), A örnek enine kesit alanı (mm^2)’ni ifade etmektedir.

Kesme yer değiştirmesi ise toplam yer değiştirmenin (Δx) örnek boyuna (L) bölünmesi ile hesaplanır.

Anizotrop malzeme olan odunda L, R ve T olmak üzere meydana gelen üç temel yöndeki gerilmeler birbirinden farklıdır.

1.1.1.2. Elastikiyet Modülü

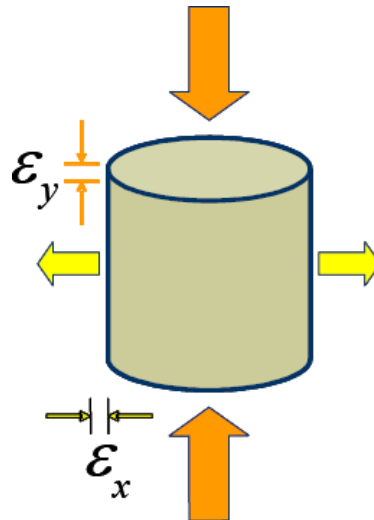
Bir birim uzama başına gerilme olarak tanımlanan ve Young’s modülü olarak da bilinen elastikiyet modülü, kuvvet uygulanan bir malzemenin kalıcı deformasyona uğramadığı elastik şekil değiştirme davranışının bir ölçüsüdür. Ağaç malzemede L, R ve T ile belirtilen üç temel yönde elastikiyet modülü vardır ve bunlar sırası ile E_L , E_R ve E_T ile gösterilir.

Elastikiyet modülü, boyuna yönde çekme, basma ya da eğilme testleri ile elde edilen yük deformasyon eğrisinin doğrusal davranış sergilediği kısımdan hesaplanır [33]. Kretschmann [32]'a göre kesme deformasyonunu da içeren eğilme testi ile elde edilen elastikiyet modülü değeri, %10 arttırılarak kesme deformasyonunu da içeren etki ortadan kaldırılabilir ve R ve T yönlerindeki elastikiyet modüllerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Bunun yanında dinamik yöntemler ile de belirlenebilen elastikiyet modülü genellikle basma testi ile elde edilirken literatürde R ve T yönündeki özelliklere çok fazla rastlanmamaktadır.

Rutubet içeriği, yoğunluk, sıcaklık, budak varlığı, sıklığı, boyutu ve konumu, yıllık halka özellikleri gibi iç ve dış etkenler elastikiyet modülünü etkiler. Rutubet ile elastikiyet modülü arasında ters ilişki mevcuttur [35].

1.1.1.3. Poisson Oranı

1760 yılında Poisson tarafından keşfedilen ve kendi adı ile anılan Poisson oranı, kuvvet uygulanan bir cismin kuvvetin türüne bağlı olarak ortaya koyduğu uzama ve kısılma davranışdır. Çekme kuvveti uygulanan malzeme kuvvet yönünde uzarken diğer yönlerde kısılacaktır. Basma kuvveti uygulandığında ise Şekil 1.5'de görüldüğü üzere kuvvet yönünde kısılma (ϵ_y) gözlenirken diğer yönlerde genişleme (ϵ_x) meydana gelecektir [36]. Burada cismin geometrisi silindir değilde küp prizma olsaydı, Z doğrultusundaki genişleme (ϵ_z) de hesaba katılacaktı.



Şekil 1.5. Poisson oranında yatay ve dikey yönde şekil değiştirme durumu [37].

Poisson oranı, yük yönündeki yer değiştirme miktarının yüke dik yöndeki yer değiştirme miktarına oranını ifade eden denklem (1.5) yardımı ile hesaplanır.

$$v = \varepsilon_{lateral} / \varepsilon_{axial} \quad (1.5)$$

Burada; v Poisson oranı, $\varepsilon_{lateral}$ (yanal) yük yönündeki yer değiştirme miktarı (mm) ve ε_{axial} (eksenel) yüke dik yöndeki yer değiştirme miktarını (mm) ifade eder.

Ağaç malzemedede v_{LR} , v_{RL} , v_{RT} , v_{TR} , v_{LT} ve v_{TL} olmak üzere altı Poisson oranı bulunmaktadır. Burada IJ , gerilmenin yönünü ve yanal deformasyonu ifade etmektedir. Yani v_{LR} 'de L gerilme yönü iken R yanal deformasyon yönüdür.

1.1.2. Ağaç Malzemenin Direnç Özellikleri

1.1.2.1. Çekme Direnci

Çekme direnci, ağaç malzemeye birbirinin tersi yönlerde etki eden ve lifleri parçalamaya ya da ayırmaya çalışan iki kuvvete karşı ağaç malzemenin göstermiş olduğu karşı mukavemettir ve liflere paralel ya da dik olmak üzere iki çeşittir. Liflere paralel yöndeki çekme direnci değerleri, odunun mikrofibrillerden oluşan ince yapısı nedeni ile bütün direnç özelliklerinden yüksektir [33]. Kollman ve Cote [38]'ye göre ağaç malzemenin çekme direnci, basma direncinden iki kat fazladır.

Bozkurt ve Göker [33] iğne yapraklı ağaçlarda yoğunluk ile liflere paralel çekme direnci arasında doğrusal ilişki olduğunu belirtmiştir. Özellikle iğne yapraklı ve halkalı büyük traheli ağaçlarda bariz olan yaz odunu iştirak oranı ile yoğunluk arasındaki doğrusal ilişki çekme direnci üzerine de doğru orantı ile etki etmektedir.

Odunun rutubet içeriği düştükçe lif doygunluğu noktası (LDN) altındaki değerlerde liflere paralel yönde çekme direnci artarken en yüksek direnç değeri %8-12 rutubet içeriği arasında elde edilmektedir [33].

Masif malzemenin çekme direnci ile sıcaklık arasında nispeten düşük ters bir ilişki mevcuttur. Yalnız malzemedeki rutubet içeriği arttıkça sıcaklığın yükselmesi çekme direnci azalmasını artırır [33].

1.1.2.2. Basma Direnci

Ağaç malzemedede liflere paralel ve dik basma ve sütun direnci olmak üzere gerçekleştirilen basma direnci yapı malzemesi olarak kullanım için önemli bir parametredir. Diğer statik deney sonuçları ile bir orantısı olduğu için basma direnci değeri ile ağaç malzemenin genel direnç özellikleri hakkında genel bir bilgi verir niteliktedir [33].

Liflere paralel basma direnci, ağaç malzemenin liflerine paralel ve birbirine ters yönde uygulanan kuvvete karşı koyma esnasında meydana gelen kırılma gerilimidir. Liflere dik yöndeki basma ile odunun yoğunluğu artırılır. Liflere paralel basma direnciyle yoğunluk arasında doğrusal bir ilişki vardır. Yoğunlukla basma direnci arasında pozitif ilişki mevcuttur [33].

Lif yönündeki açısal farklılıklar çok küçük olsa dahi kuru haldeki odunun lif yönündeki basma direncini oldukça düşürmektedir. Kuruma sonucu artan gevreklik bu durumun temel sebeplerindendir [33].

1.1.2.3. Eğilme Direnci

Eğilme direnci, iki mesnet üzerindeki bir malzemeye ortadan tek ya da çok noktadan uygulanan kuvvet ile taşıyabileceği en fazla yükü belirtir. Uygulanan yük ile malzemede basınç, çekme ve kesme gerilmeleri ortaya çıkar. Kretschmann [32]'a göre eğilme direnci değerleri elastik limitler içerisinde kalmak kaydı ile geçerlidir. Zira Bozkurt ve Göker [33]'e göre daha fazla yüklerde deformasyonlar gerilmelerle orantılı olmamakla birlikte çekme ve basınçta elastikiyet modülleri farklı olmaktadır.

1.1.2.4. Şok (Dinamik Eğilme) Direnci

Saniyenin binde birinde oluşan ve maddenin enerji abzorbe edebilme kabiliyetine bağlı olan şok direnci değeri, yüksek ise esnekliğe, düşük ise gevrekliğe neden olur. Çok kısa süreli yüklemelerde statik yükün %150'sine kadar dayanım sağlanabilmektedir [33].

Genellikle iğne yapraklı ağaçların R yönündeki şok direnci T yönünden daha yüksek iken yapraklı ağaçlarda bu farktan söz edilmemektedir. Lifdeki 5°'lik açı, şok direncini %10 düşürürken 10° açı %50 düşürmektedir [33].

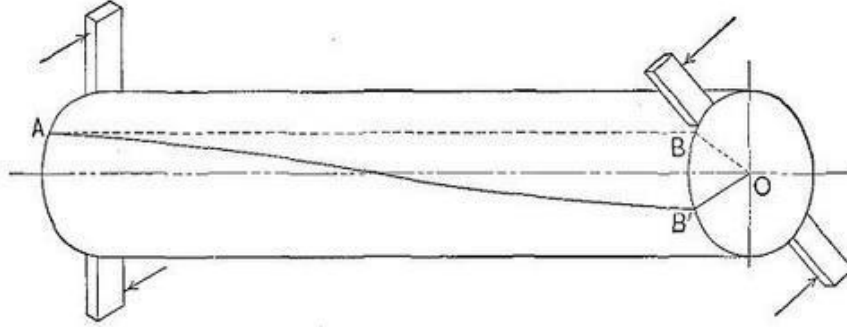
%1'lik rutubet azalmasıyla şok direncinde %0,5'lik azlama olduğu fakat %10-20 arasındaki rutubet içeriğinin şok direnci üzerinde bir değişime neden olmadığı belirtilmektedir [33].

Eksi 20°C ve +20°C sıcaklıklar arasındaki sıcaklık değişiminin şok direnci üzerinde önemli olmadığı fakat -20°C altındaki sıcaklıkların hava kurusu çam odununun şok direnci üzerinde ciddi düşüşlere neden olduğu belirtilmektedir [33].

1.1.2.5. Torsiyon Direnci

Torsiyon testi, Şekil 1.6'da görüldüğü üzere malzemenin A ve B ile gösterilen noktalarından birbirine ters yönde iki kuvvet tarafından bir eksen üzerinde çevrilerek

burkulması ile meydana getirdiği burulma momentidir. Bu moment, malzeme özelliği ve enine kesit alanına bağlıdır. Dolayısı ile oluşan deformasyon ve malzemenin kırılma şekli, enine kesitin geometrik şekline bağlı olarak değişir [33].



Şekil 1.6. Torsiyon testi konfigürasyonu [39].

Bozkurt ve Göker [33]'e göre odunun liflere paralel bükülmesi durumunda G_{LR} ve G_{LT} kesme modülleri devreye girmektedir. Yaz odunu iştirak oranı ile artan torsiyon direnci, yoğunluk artışı ile doğru orantılı olarak artar.

LDN'ye kadar rutubet içeriğinde meydana gelen artış ile torsiyon direnci doğru orantılı olarak azalmaktadır. Rutubet içeriğindeki %1'lik artışın ya da azalmanın %3'lük torsiyon direnci azalışına ya da artışına neden olduğu belirtilmiştir [33].

İğne yapraklı ağaçlarda liflere paralel torsiyon direnci, liflere dik yöndeki değerlerin 2,9-3 katıyken yapraklılarda bu oran 1,55-8 kata kadar çeşitlilik gösterebilmektedir [33].

1.1.2.6. Kesme Direnci

Kesme direnci, yanyana ve birbiri ile bütünleşmiş iki düzlemi zıt yönlerde kaydırarak birbirinden ayırmaya çalışan kuvvetlere karşı koyma direncidir ve genellikle yapısal malzeme ve konstrüksiyonlardaki birleşimlerde önemlidir. Liflere dik kesme direnci, liflere paralel kesme direncinden 3-4 kat büyükken kesme direnci torsiyon direncinden daima ve belirgin olarak küçüktür. Kesme testleriyle saf kesme gerilmeleri elde edilememektedir çünkü test esnasında eş zamanlı olarak basınç, eğilme, travers basınç ezilmeleri nedeniyle farklı yan gerilmeler meydana gelmekte ve kırılmayı etkilemektedir. Kesme direnci, odunun çalışması sonucu oluşan çatlaklar nedeni ile ciddi miktarda düşmektedir [33], [40].

Kesme direnci üzerine rutubet içeriğinin etkisi çekme ve basma dirençlerinden fazladır. Forest Product Laboratory'ye göre rutubet içeriğindeki %1'lik azalma kesme direncinde %3'lük bir artışa neden olmaktadır [33].

Yıllık halkalar, kesme yüzeyine sıfır derece ile açı yaptığında kesme direnci en yüksektir. 90°'lik açı ise 45°'den daha iyi sonuç vermektedir [33].

1.1.2.7. Aşınma Direnci

Aşınma, yürüme, taşıma, sürtünme, darbe, kum, kir, kimyasallar, rutubet, sıcaklık, titreşim ve diğer nedenler ile meydana gelen deformasyonlar olarak özetlenebilir. Aşınma direnci ise malzemenin bu etkenlere karşı gösterdiği mukavemeti ifade eden çok önemli bir mekanik özelliktir [33].

Yoğunluk, ağaç türü, deformasyona uğrayan yüzeyin kesiliş şekli, rutubet içeriği, dalgalı liflilik, yüzeyin durumu ve koruyucu üst yüzey katmana sahip olup olmaması gibi özellikler aşınmayı etkiler. Yoğunluk ile aşınma dayanımı arasında pozitif bir ilişki vardır ve yoğunluk ile sertlik arasındaki gibi doğru orantılıdır [33].

LDN'ye kadar rutubet içeriğinde meydana gelen artış ile aşınma direnci azalmaktadır. Fakat testler esnasında sürenin uzaması ve ortaya çıkan ısının etkisinin artması nedeni ile bu azalmada sıcaklığın etkileşimli etkisinin olabileceği de göz ardı edilmemelidir. Rutubet içeriği ile azalma eğilimi gösteren sertlik ve kesme direnci, ağaç malzemenin aşındırıcı etkilere karşı koyma davranışını etkiler [33].

Aşındırıcı kuvvet ile lif yönü arasındaki açının artışı aşınmaya karşı koymayı arttırmaktadır. Ayrıca aşınma yüzeyinde yıllık halkaların yatık olması durumundaki aşınma, dik olması durumunda ortaya çıkandan yaklaşık iki kat fazla olacaktır [33].

Ağaçlardaki eterik yağ ve reçinelerin aşınma üzerinde önemli etkisi olduğu belirtilmektedir. Farklı özellikteki örtücü ya da şeffaf katman uygulamaları, aşınmaya karşı koymada büyük önem taşır. Fakat bu katmanın düzenli bakımının yapılması gereklidir [33].

1.1.3. Ağaç Malzemenin Mekanik Davranışını Etkileyen Doğal Faktörler

Ağaç malzemenin mekanik davranışı etkileyen temel doğal faktörler aşağıdaki gibidir.

1.1.3.1. Yoğunluk

Odun, yapısı gereği homojen bir yoğunluğa sahip değildir. Bozkurt ve Göker [33]'e göre yaz odunu iştirak oranı ile yoğunluk arasında doğru orantı vardır. Dolayısı ile yıllık halkaların oluşumu esnasındaki farklılık odunun kesitsel yoğunluk farkına da neden olacaktır. Kretschmann [32]'a göre yoğunluk ağaç malzemenin kusursuz olması

varsayımı ile mekanik özellikleri çok iyi şekilde yansıtır. Fakat deney örnekleri zank, reçine ve ekstarktiflerden tam anlamı ile arındırılmış olarak düşünülemez ve bunlar test edilen mekanik özellikler üzerine az da olsa etki yapar.

1.1.3.2. *Budaklar*

Büyüme kusurları olan kaynamış ya da düşen budaklar, lif süreksizliğine neden olan ve hem direnç özelliklerine hem de görsel estetik üzerine ciddi olumsuz etkisi olan kusurlardır. Bu olumsuz etki budak sayısı, budağın konumu, boyutu ve cinsi ile artabilir ya da azalabilir. Haygreen ve Bowyer [41]'a göre eğilme gerilmesinde budağın üst tarafta olması tehlikenin şiddetini düşürücü etkiye sahiptir çünkü alttaki budak çekme gerilmesine, üstteki budak ise basma gerilmesine maruz kalır. Budaklar ve kertiklerin odunun elastik özellikleri üzerine ciddi etkileri vardır ve budaklar, özellikle taze haldeki odunda direnç değerlerini çok düşürürler [33]. As vd. [42]'ne göre budaklar, yoğunluk, sertlik ve makaslama direnci üzerinde artışa neden olurken basma, çekme, eğilme ve dinamik eğilme direncinde ve elastikiyet modülünde düşüşe neden olmaktadır.

1.1.3.3. *Lif Kıvrıklığı Ve Lif Düzensizliği*

Lif kıvrıklılığı, ağacın yetişmesi esnasında liflerinin gövde aksı ile açı yapması ya da spiral bir hat çizmesi sonucu meydana gelen kusurlardan biridir ve tamamen düzgün lifli ağaçlara pek sık rastlanmaz. Lif kıvrıklığı, bazı durumlarda dışarıdan bakıldığında belli iken bazı durumlarda kabuk soyulması sonrasındaki kuruma sonucu ortaya çıkan çatlaklar yardımı ile belli olmaktadır. Anizotropik malzemelerde elastik ve direnç özellikleri, lif yönüne bağlı olarak değişir [33]. Odunun mukavemeti, önemli bir kusur olan lif kıvrıklığındaki açının artması sonucu ciddi oranda azalmaktadır [43].

Yapı malzemesi olarak kullanılacak odunda lif kıvrıklığı olması, onun son derece tehlikeli ve kusurlu bir malzeme olarak değerlendirilmesine neden olur fakat kaplama vb. gibi dekoratif unsur olarak kullanılması durumunda bu tehlike ortadan kalkar [43].

1.1.3.4. *Yıllık Halka Yönü*

Yıllık halka yönü, tomruğun veya odunun biçilişine ya da kesimine bağlı olarak sıfır ila doksan derece ve bunların arasında bir yönelime sahip olur. Bu iki değerde kesim parça geometrisine bağlı olarak teğet ve radyal şeklinde adlandırılır. Fakat odunun homojen bir yapısı olmadığı için uçlar arası yönelim farklılıkları olabilir. Dolayısı ile yıllık halka yönü farklılıkları mekanik özellikler üzerinde farklı etkilere neden olurlar.

1.1.3.5. *Reaksiyon Odunu*

İğne yapraklı ağaçlarda basınç, yapraklı ağaçlarda çekme odunu adı verilen reaksiyon odunu, eğilme nedeniyle ağaçta meydana gelen mekanik gerilmelerin bir sonucu olarak meydana gelir [43].

Basınç odunu yoğunluğunun normal odundan %40 daha fazla olduğu ve boyuna daralmanın basınç odununda daha fazla olduğu belirtilmiştir. Basınç odununun, direnci normal oduna göre daha zayıf, elastikiyeti, eğilme ve şok direnci değerleri daha düşüktür. Gevrek bir yapıya sahiptir. Normal odundaki bağlı su azalımı ve yoğunluk artışı ile birçok direnç özelliği iyileşirken basınç odununda bu ilişki yoktur [43].

Çekme odunu, normal odundan daha fazla yoğunluğa sahiptir ve boyuna daralma miktarı fazladır. Çekme odununun çivilenmesi güçtür. Mekanik özellikler üzerinde farklı etkilere sahiptir [43].

1.1.3.6. *Genç Odun*

Yıllık halka genişliğinin fazla olduğu genç odunda, yaz odunu katılım oranı ve yaz odunu yoğunluğu daha azdır. Lignin yönünden zengin olan genç odunda, selüloz oranı azdır, kısa boylu hücreler vardır ve S2 tabakasındaki mikrofibril açıları büyüktür. Genç odunun kristallik ve yoğunluk değerleri düşüktür [44].

Yüksek derecedeki fibril açısı nedeni ile genç odun, olgun odundan on kat daha fazla boyuna daralma gerçekleştirir. Genç odun iştirakının artması, kesme direncinde değişime neden olur [32].

1.1.3.7. *Yetiştirme Süresince Maruz Kalınan Doğal Basma Yükleri*

Rüzgar, uzun süreli kar altında kalma, zemin eğimi ya da düzensizlikleri, bakı gibi dış etkenler odunda doğal basma yükleri oluşturur ve bu da odunun mekanik davranışı üzerinde ciddi etkilere neden olur.

1.1.3.8. *Reçine Keseleri*

Türk Dil Kurumu'na göre bazı açık tohumlular ve bunların benzerlerinde bulunan küçük keselerdir. Bu keseler reçine maddesinin biriktirildiği yerlerdir. Bu keselerin kanal boyu, sayısı ya da yoğunluğu ve konumları odunun mekanik özelliklerini etkileyen etkenlerdendir zira reçine kanallarının çok olması kanal ya da kese etrafındaki katmanların bağ yapmasını zayıflatarak süreksizliğe neden olabilmektedir [32]. Çamlarda genellikle çapları büyük olan reçine kanallarından bolca bulunur [43].

1.1.3.9. Ekstraktifler

Odun içerisinde ekstraktif ya da yabancı madde denilen, hücre lümenine ve çeperine depo edilmiş organik maddelerden meydana gelen çeşitli maddeler bulunmaktadır. Bunlar; sakız, eterik yağ, reçine, mum, şeker, nişasta, alkaloid ve tanendir. Odun türüne ve özodun ve diriodun kısımlarına bağlı olarak odundaki iştiraki %1'den az olabildiği gibi %10'dan fazla da olabilmektedir. Bunlar, uygun çözücü ve yöntemler ile odundan uzaklaştırılabilirler [43].

1.1.4. Ağaç Malzemenin Mekanik Davranışını Etkileyen Çevresel Faktörler

Ağaçların gelişim süreci içerisinde çevre faktörlerinin odun yapısına etkisi önemlidir çünkü tüm biyolojik süreçler için uygun fiziksel şartlar oluşturulmakta ya da olgunlaştırılmaktadır [44].

Sıcaklık, ışık şiddeti, su miktarı, gıda maddesi, fotoperiod, iklim özellikleri, coğrafik şartlar ve rüzgar, don etkisi, yangın, sel, silvikültürel müdahale ve çevre kirliliği gibi dönemsel etkilere [44], [45] maruz kalan ağacın odunu, mekanik davranış olarak farklılık gösterecektir. Bununla birlikte bu ağaçlardan elde edilen odunlar, kullanım yerindeki rutubet, sıcaklık, yüklenme süresi ve hızı, sünme, yorulma, kimyasallara maruz kalma, yaşlandırma, kimyasal işlemler, nükleer radyasyon, küf ve mantar, çürüklük, bakteri ve böcek gibi çevresel faktörlerden etkilenerek farklı mekanik davranışlar sergileyecektir.

1.1.4.1. Rutubet

Higroskopik bir malzeme olan ahşap, bulunduğu ortamın denge rutubet içeriğine ulaşmak için rutubet alışverişi gerçekleştirir. Dolayısı ile kullanım yerine uygun rutubet içeriğine sahip ahşap malzemenin kullanımı ile çalışma değerlerinin en aza indirilebileceği ve malzeme boyutunun sabit tutulabileceği göz ardı edilmemesi gereken bir husustur.

Mekanik özelliklerde %30'un üzerindeki rutubet içeriğinde kayda değer değişiklikler olmaz zira bu değerlerde su hücre boşluklarında bulunur ve değişim bağlı su sınırları arasında gerçekleşir [33].

Bozkurt ve Göker [33]'e göre E_L , rutubete karşı en duyarlı olan elastik sabittir ve kesme modülü ile rutubet içeriği arasındaki ilişki Çizelge 1.1'deki gibidir.

Çizelge 1.1. Çeşitli rutubet içeriğine göre kesme katsayılarının değişimi.

Kesme Modülü	Rutubet İçeriği ($R\dot{I}$) \geq %30	
	$R\dot{I} = \%0$	$R\dot{I} = \%12$
G_{RT}	1,29	1,36
G_{LT}	1,85	1,54
G_{LR}	1,56	1,44

Basma direnci, LDN altındaki kuruluk değeri ile pozitif ilişkiye sahipken LDN üzeri değişimler önemli değildir. Liflere dik yöndeki basma direncinin rutubetten etkilenme oranı paralele göre daha azdır [33].

Kurtoğlu [46] özellikle LDN altındaki rutubet miktarının odunun yoğunluk, akustik, mekanik ve direnç özelliklerine etki ettiğini belirtmiştir. Kurtoğlu [47] bölgesel olarak değişimle birlikte ülkemizdeki denge rutubeti miktarını, %5-17 olarak belirtmiştir. Toros karaçamı, kızılçam ve sarıçam odunlarının LDN rutubet değerleri sırası ile %30, %25,5 ve %29,8 olarak belirtilmiştir [46].

Hemen hemen tüm mekanik özellikler, rutubet içeriğinin LDN altına inmesi ve sıcaklığın artmasıyla genellikle doğrusal ilişkili olarak artar. Rutubet içeriğindeki değişimler, aynı zamanda boyutsal değişimlere de neden olur. Rutubet içeriğinin LDN üstündeki değerlere doğru artması, mekanik özellikler üzerinde ciddi bir değişikliğe neden olmaz [35].

Rutubet içeriğinin LDN altına düşmesi ile yoğunluk artışı meydana gelir. Bu durum kuruma süresince hacimsel küçülmenin ağırlık azalımından daha fazla olması nedeni ile ortaya çıkar [41].

Odunun temel eksenlerindeki mekanik özellikler, rutubet içeriğindeki değişimlerden farklı oranlarda etkilenirler. Ozyhar [48]'a göre genellikle basma özellikleri çekmeden ve liflere dik yöndeki özellikler lif yönündekilerden daha fazla etkilenir.

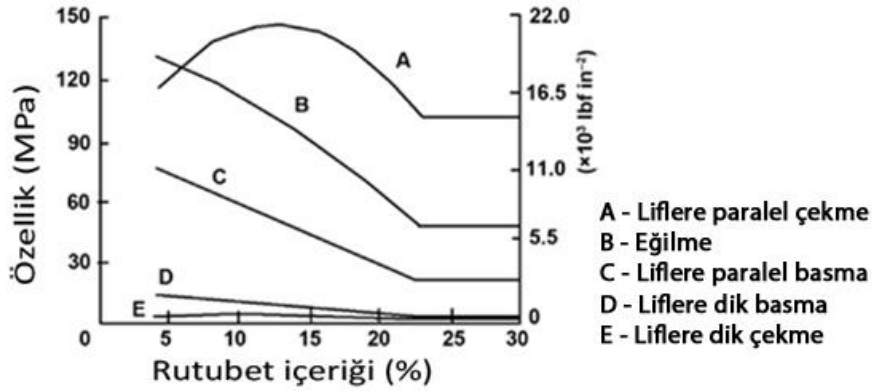
Panshin ve DeZeeuw [49]'a göre ağaç malzemenin birçok direnç ve elastik özelliği, LDN altında rutubet içeriği ile ters orantılı olarak değişmektedir.

Dinwoodie [10]'ye göre sertlik ve dinamik özellikler sırası ile direnç ve statik özelliklerden daha hassastır ve rutubet içeriği değişiminden daha kolay etkilenebilirler.

Green vd. [50]'ne göre kerestede çok fazla budak olması malzemenin kalitesini düşürmesinin yanında rutubet içeriği değişimlerine de duyarsız olmasına neden olur.

Matan ve Kyokong [51] rutubet içeriğinin LDN altına doğru azalması ile liflere paralel kesme direnci ve kesme modülü değerlerinin arttığını, LDN üstündeki rutubet içeriklerinde ise neredeyse herhangi bir değişimin olmadığını belirtmiştir. Kretschmann ve Green [52] Güney Amerika Çamı'nın liflere paralel kesme direnci değerinin rutubet içeriğinin taze kesilmiş halden %4'e kadar düşüşü ile arttığını belirtmiştir. Ozyhar vd. [53] meşe odunu kesme modülünün %50-65-85 ve 95 bağıl nem (BN) seviyesindeki değerlerini belirleyip rutubet içeriğinin bu değerler üzerine ciddi etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Hering vd. [54] Avrupa Kayını kesme modülünün rutubet içeriği artışı ile azalış gösterdiğini belirtmiştir.

Şekil 1.7'de rutubet içeriğindeki %0 ile %30 arasındaki değişimlerin çekme, eğilme ve basma direnci üzerine etkisi görülmektedir [52].



Şekil 1.7. Rutubete bağlı meydana gelen direnç değişimleri.

1.1.4.2. Sıcaklık

Ağaç malzemenin mekanik özellikleri, sıcaklık ile genel olarak ters ilişkilidir. Rutubet içeriğinin sabit olması durumunda mekanik özellikler, 150°C altındaki sıcaklık değişimlerinde hemen hemen doğrusal davranış sergiler. Ağaç malzemenin ani sıcaklık değişimleri altında test edilmesi ani tepki davranışını ortaya çıkarır ve bu durumda 100°C altı sıcaklıklarda ters ani tepkiler meydana gelir. Rutubet içeriği %12 olan bir ağaç malzemenin direncinde -29°C ve 38°C arasındaki sıcaklık değişimlerinde çok büyük farklar olmayabilir fakat kuru olmayan ağaç malzemedede genellikle sıcaklık artışı ile direnç değerleri düşer. Oda sıcaklığında elde edilen değerler, sıcaklığın 7°C ile 38°C arasında değişmesi ile kayda değer oranda değişmez [32].

Bozkurt ve Göker [33]'e göre direnç ve elastikiyet, sıcaklık artışı sonucu selülozun kristal yapısının termik genişlemesi ve termik olarak moleküllerin salınımının artması

nedeni ile azalmaktayken ağaç malzeme yoğunluğunun artışı sıcaklığın direnç özellikleri üzerindeki azaltıcı etkisini hafifletmektedir.

Tam kuru haldeki odunun liflere paralel basma direnci ile (-191 ile +200°C aralığındaki) sıcaklık arasında doğrusal ters ilişki vardır [33].

Ağaç malzemenin bazı özellikleri, ısı işlem gibi yüksek sıcaklıklarda belli süreler boyunca modifiye edilerek geliştirilirken bazı özelliklerinde geri döndürülemez kayıplar olmaktadır. Sıcaklığın ağaç malzemedeki kalıcı ağırlık ve direnç kaybına neden olduğu bir üst sınırı mevcuttur. Rutubet içeriği, ısı ya da ısıtma kaynağı, sıcaklık, muamele süresi, odun türü ve parça geometrisi ve boyutuna bağlı olarak yüksek sığa maruz kalma sonucu meydana gelen kalıcı hasar türleri ve boyutu değişkenlik gösterebilir [32]. Haygreen ve Bowyer [41]'a göre 100°C, Dinwoodie [10]'ye göre 95°C altındaki sıcaklıklarda ağaç malzeme direncinde değişimler meydana gelse de genellikle bunların çok azı kalıcı olmaktadır fakat sıcaklığa uzun süreli maruz kalma durumunda direnç kayıpları kalıcı olabilmektedir. Ayrıca rutubet içeriğinin yükselmesi sıcaklığa olan hassasiyeti artırır. Gerhards [35]'a göre 50°C üzeri sıcaklıklarda LDN üzeri rutubet içeriğine sahip ağaç malzemenin kesme modülü %25 oranında düşmektedir. Ayrıca sıcaklığın taze hal odununa etkisi, LDN üstünde daha fazla olmaktadır. Dinwoodie [10]'ye göre -200 ile +200°C arası sıcaklıklarda sıcaklık değişimi ile direnç özellikleri arasında doğrusal ters ilişki mevcuttur.

Sıcaklığın basma direncine etkisi, %0, %12 ve LDN üzeri rutubet içeriğindeki odunda 20°C altı ve üstü olarak incelenmiş ve ters ilişki olduğu belirtilmiştir [55]–[60].

Bekhta ve Niemz [61]'e göre ladin odunun eğilme direnci, sıcaklığın 100°C'dan 200°C'a çıkması ile %50'ye kadar düşmüş iken elastikiyet modülünde bir değişim belirlenmemiştir.

Gerhards [35]'a göre sıcaklığın mekanik özelliklere etkisi, yüksek rutubet içeriği ile daha da artmaktadır. Sıcaklık ile rutubet içeriğinin etkileşimli etkisi, elastikiyet modülü üzerindeki etkiyi daha belirgin hale getirmektedir [55], [60], [62]–[72].

Yang vd. [73] 170, 190 ve 210°C sıcaklıkta 1, 2 ve 4 saat muamele ettiği Japon sedirinin kesme direncindeki değişimleri incelemiş ve kesme direncinin sıcaklık artışı ile düştüğünü belirlemiştir.

Sıcaklık seviyesi ve sıcaklığa maruz kalma süresine bağlı olarak ağaç malzemedeki kütle kaybı meydana gelir ve bu, etkileşimli olarak ağaç malzemenin bazı özelliklerini etkiler.

1.1.4.3. Kimyasallara Maruz Kalma Ve Kimyasal İşlemler

Haygreen ve Bowyer [41]'a göre kimyasallar, delignifikasyon, hidroliz ve oksidasyon gibi tepkimelere neden olarak odunun direnç özelliklerinde kayıplara neden olabilmektedir. Kretschmann [32]'a göre asit ve alkaliler sert ağaçlarda yumuşak ağaçlara oranla daha fazla etkilidir. Ayrıca diri odun, asit ve alkalilerin saldırılarına öz oduna göre daha duyarlıdır.

Ağaç malzemenin kullanım amacı ve yerine göre gerekli mekanik özelliklerini iyileştirebilmek, çevrede meydana gelen yangın vb, olumsuz koşullara karşı koyabilmek, hizmet süresini arttırmak, işlevini uzun bir süre güvence altına almak ve bakım onarım maliyetlerini en aza indirmek için kimyasallar ile modifiye edilebilmektedir. Fakat burada bir özellik iyileştirilmek istenirken başka bir özellik olumsuz etkilenebilmektedir. Kretschmann [32]'a göre kimyasallar ile modifiye edilen ağaç malzemenin mekanik özelliklerinde düşme meydana gelse de modifiye edilmemiş mekanik özelliklerin olumsuz çevre koşullarında çok daha fazla düşerek malzeme yıkıma uğrayabilecektir.

Gardner vd. [74] tutkal hattına dik ya da paralel kesme direncinin kreozot muamelesinden etkilenmediğini belirtmiştir.

Yüzde 10 rutubet içeriğindeki odunun liflere dik kesme direnci, NaOH veya NH₄OH ile muamele edildiğinde anlamlı bir şekilde artarken, H₂SO₄, HCl ve HNO₃ ile muamele edildiğinde anlamlı bir şekilde azalmaktadır. Tüm kimyasallar, rutubet içeriği %30'un üzerine çıktığında kesme direnci üzerinde anlamlı bir azalmaya neden olmaktadır. Odunlarda meydana gelen degradasyon ise NaOH ve NH₄OH'da fosilizasyon, H₂SO₄ ve HCl'da kahverengi çürüklük ve HNO₃'de beyaz çürüklük olarak meydana gelmektedir [75].

1.1.4.4. Yaşlandırma

Bucur [76]'a göre birçok olası etken odunun doğal yaşlanmasını etkileyebilir. Havadaki oksijenin neden olduğu termal oksidasyon, hücre duvarlarındaki bağlı suyun asit hidrolizi, odundaki diğer asitlerin etkileşimli etkisi bu etkenlerdendir.

Yaşlandırma ile odunun, kimyası, rengi, fiziksel ve mekanik özellikleri de modifiye edilebilmektedir. Yoğunluk, odunun mekanik özelliklerini açıklayıcı anahtar bir özelliktir ve doğal yaşlanma ile değişime uğrar [77].

Odunun doğal yaşlanması çok yavaş ve uzun süren bir işlem [77] iken hızlandırılmış yaşlandırma bu sürelerin günler ya da aylar seviyesine indirilmesini sağlayan koşullarda gerçekleştirilen bir modifikasyon yöntemidir. Gillespie [78]'ye göre malzemenin dayanıklılığı, kullanılabilirliği ve uzun soluklu performansını değerlendirmek için hızlandırılmış yaşlandırma gerçekleştirilir fakat laboratuvar ortamında gerçekleştirilen bu testlerin sonuçları, birçok konstrüksiyonun hizmet ömrünü gerçeğe yakın netlikte tahmin edememektedir. Kretschmann [32] eski ağaç malzemeler üzerinde gerçekleştirilen test sonuçlarına dayanarak doğal ya da normal yaşlanma koşullarında kusursuz ağaç malzemedeki direnç kayıplarının birkaç yüzyıl sonra oluşacağını belirtmektedir.

1.1.4.5. Nükleer Radyasyon

Ağaç malzemenin nükleer ışınımına maruz kalması, çok sık rastlanılan bir olay olmamakla birlikte tahribatsız muayenelerde bu durum görülebilir [32]. Odunun rutubet içeriği ve yoğunluğu, nükleer yöntemler ile ölçülebilir. Odundaki rutubet içeriği, hızlı nötron ışınım kaynağı ile hidrojen konsantrasyonu ölçümü şeklinde gerçekleştirilir. Gama ışınımı ise malzemenin yoğunluğunu belirlemede kullanılır [79]. Loss [80]'a göre alfa ışınımı, odunun rutubet içeriği ve yoğunluğu ölçümünde sınırlı alana erişimi nedeni ile kullanılamamaktadır. Byrne ve Drew [81] odundaki çürük ve deliklerin tespitinde gama ve nötron ışınımı kullanmıştır. Gama ışınımı odunu tahrip eden organizmaların yok edilmesinde ve akrilik ve doymamış polimer reçinelerinin polimerizasyonunu aktif hale getirebilir.

Kretschmann [32] çok yoğun nükleer ışınım kaynağı kullanımının, ağaç malzemedeki kayda değer bozulmalara neden olduğunu belirtmiştir. Genellikle 10kGy' ye kadar olan gama ışını, ağaç malzemedeki direnç özelliklerinde çok fazla değişime neden olmamaktayken MGy seviyelerindeki ışınım ciddi kayıplara neden olur.

USDA [82]'ye göre hafif ışınım seviyeleri, odunu fiziksel olarak etkilemez fakat çok yüksek dozdaki gama (γ) ışınları ya da nötronları odunun mühim seviyelerde bozulmasına neden olur. Genellikle 1 megarad'a kadar gama ışınımı, odunun direnç özelliklerine çok az etki yapar. Bu değer üzerinde ise liflere paralel çekme direnci ve tokluk düşer. 300 megarad dozunda ise çekme direnci %90 azalır. 1 megarad üzeri gama ışını, liflere paralel basma direncini de etkiler fakat daha yüksek dozdaki etkisi çekme direnci kadar değildir zira 300 megarad'da basma direnci, yaklaşık 1/3'ü kadar düşer.

Gama ışınlarının kesme direncine etkisi, çekme ve basma direncine etkisinin ortasındadır.

1.1.4.6. *Küf Ve Mantarlar*

Mantarlar, bakterilerle kıyaslandığında odunda çok daha büyük yıkımlara neden olabilmektedir. Renk değişimi ve çürüklük bunların başında gelmektedir. Mavi renk mantarları, şok direnci haricinde odunun direnç özellikleri üzerine ciddi etki yapmamaktadır. Mantarlar, gelişim için oksijene ihtiyaç duyduklarından suya doymun durumdaki oduna arız olamazlar. Mantarın odun içerisindeki ilerleyişi boyuna yönde daha hızlı olur. Öz odun, diri oduna göre daha dayanıklı olsa da mantarlar için gerekli gıda maddesi olan nişastayı barındırır [43].

1.1.4.7. *Çürüklük*

Odunda çürümüş odunun görünüşüne bağlı olarak beyaz çürüklük ve esmer çürüklük meydana gelmektedir. Odunun rengi, esmer çürüklük mantarlarının ileri boyutlu tahribatı sonucunda kahverengine dönüşür ve odun kömürleşmiş gibi ve çatlaklı olur, kolayca ufalanabilir hale gelir. Genellikle iğne yapraklı ağaçlarda görülen bu duruma destrüksiyon yani yapının yıkımına neden olan çürüklük denir. Yapraklı ağaçlarda ise korozyon çürüklüğü denilen beyaz delikler veya çizikler ile birlikte süngerimsi ya da lifli bir yapı ortaya çıkar. Esmer çürüklükte selüloz ve hemiseluloz yıkıma uğrarken beyaz çürüklükte lignin de tahrip edilir. Diğer bir çürüklük tipi de etkileri esmer çürüklüğe benzeyen yumuşak çürüklüktür ve diğerlerine göre daha az önemlidir [43].

Odundaki çürüme derecesi, odunun Modulus of Rupture (MoR), eğilmede maksimum yük, liflere dik basma, liflere paralel çekme, sertlik ve kesme direnci gibi direnç özelliklerinde meydana gelen değişimler ile ölçülebilir [83]–[86].

1.1.4.8. *Bakteri Ve Böcek Zararlıları*

Bakteriler, ıslak haldeki odunlara arız olurlar. Bakteri saldırıları sonucu ortaya çıkan etki, mantar saldırısı sonucu ortaya çıkan etki ile kıyaslandığında önemli olarak görülmez. Fakat bu canlı organizmalar selülozu tahrip eder ve organik bileşenlere saldırabilirler [43].

Böcekler, hem diri hem de öz odun içerisinde tüneller açabilir ve odunun iç kısmını toz haline getirebilirler. Bunun yanında çürümeye sebebiyet verecek mantarları da beraberlerinde oduna taşıyabilirler. Genellikle tomrukların kabuğu altında gelişip oduna

arız olduklarından dolayı kabuk soyma işleminin ivedilikle yapılması ve tomruğun biçilmesi, bu zararlıları uzak tutmada en etkili tedbirlerdendir [43].

1.1.5. Ağaç Malzemenin Mekanik Davranışını Etkileyen Zamana Bağlı Faktörler

Ağaç malzeme, kullanım yerinde yüklenme süresi ve hızı, sünme ve yorulma gibi zamana bağlı olarak meydana gelen etkilerden dolayı mekanik davranışında farklılaşma sergiler.

1.1.5.1. Yükleme Süresi Ve Hızı

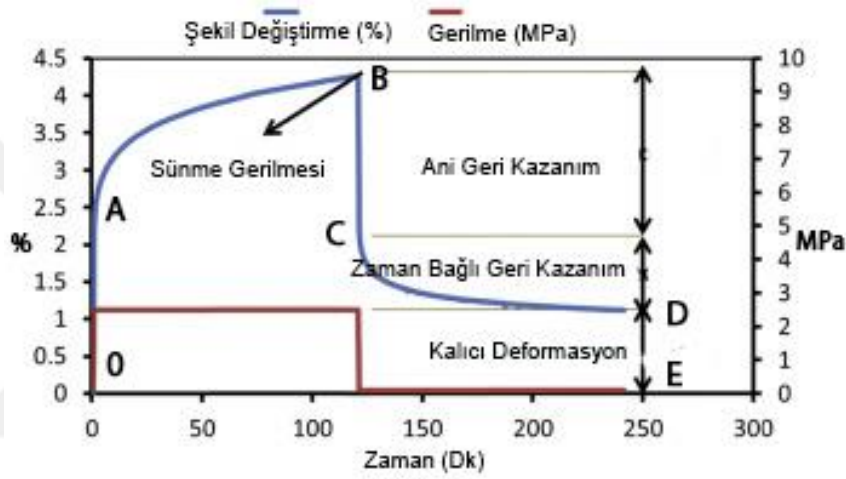
Ağaç malzeme, türe, modifikasyon yapıp yapılmadığına, geometrisine, konstrüksiyon detayına, uygulanan yükün türü ve boyutuna bağlı olarak farklı elastik ve plastik davranış sergiler. Sabit ya da aralıklı uygulanan yük, ağaç malzemenin elastik sınırları içerisindeyse malzeme işlevini uzunca süre yerine getirebilecek ve yapısal sağlamlık güvence altına alınabilecektir. Fakat sıcaklık ve bağıl nem gibi çevre koşullarındaki değişimler, malzemenin güvenle taşıyabileceği yüklenme süresi üzerine etki edebilir. Dolayısı ile zamana bağlı elastik mekanik davranışı açıklayan viskoelastisite teorisi, bu gibi koşullarda ağaç malzemenin gerçeğe yakın davranışını belirleme adına önemlidir [87], [88]. Ozyhar vd. [89] kayın odunun zamana bağlı visko-elastik davranışını belirlemek için tüm yönlerde çekme ve basmada sünme gerçekleştirmiştir. Tam anlamıyla visko-elastik davranışı karakterize edebilmek için tüm elastik sabitlerin belirlenmesi gereklidir.

Ağaç malzemenin direnç özellikleri, standartlarda belirtilen yükleme hızları ile belirlenir. Dolayısı ile yükleme hızının değiştirilmesi mekanik davranışı da değiştirecektir. Zira standart doğrultusunda ölçülen kırılma anındaki statik yük değeri, malzemede 1sn içinde kırılmaya neden olan yük değerinden %10 daha düşüktür [32].

1.1.5.2. Sünme

Şekil 1.8'de görüldüğü üzere malzemeye, zamanın sıfır olduğu anda sabit bir yük uygulandığında zamana bağlı olarak 0 ile A noktası arasında elastik bir deformasyon gerçekleşir. Gerilmenin devam etmesi durumunda A ile B arasında gösterilen gecikmiş deformasyon olarak da adlandırılan sünme meydana gelir. B ile gösterilen zamandan sonra gerilmenin kalkması, C'ye kadar ani geri kazanım oluşur. C noktasından D noktasına kadar ise zamana bağlı (gecikmiş) kısmi geri kazanım (sünme) gerçekleşir. D noktasından sonraki süreçte ise kalıcı deformasyonlar oluşur [33].

Uygulanan yükün meydana getirdiği şekil değiştirmeler, bağları kopartacak kadar büyük değilse odun elastik olarak davranır. Fakat gerilmeler, bağları kopartırsa bağların değiş tokuşu ile zincirler arasında farklı hareketler meydana gelir. Ayrıca moleküllerin kırılması ya da kristalitelerin kesilmesiyle kalıcı şekil değiştirme oluşabilir. Bu tip süreçlerin olması, sünmenin son aşamasında ya da çok yüksek sünme hızlarında muhtemeldir. Ayrıca doğal bir malzeme olan odunda sünme davranışı, budak, yıllık halka, reçine kanalı ve lif düzensizliği gibi doğal kusurlar nedeniyle farklılaşabilir [90]. Odunun zamana bağlı davranışı, anizotropiye, sıcaklığa, rutubet içeriğine ve gerilmelere bağlıdır ve tüm polimerik malzemeler gibi odun da visko-elastik davranış sergiler [91].



Şekil 1.8. Sünme davranışı [92].

1.1.5.3. Yorulma

Bao vd. [93]'ne göre yorulma, dalgalı ya da değişken yükleme koşulları altında malzemenin iş göremez hale gelmesi durumudur. Fakat Smith vd. [94]'ne göre malzemenin yorulma işgörmezliği, sürekli ya da döngüsel yüklemeler altında oluşan gerilmelerle de meydana gelir ve daimi gerilmeler, odunda statik yorulma denilen hasar etkilerine sahip iken döngüsel gerilmeler, döngüsel yorulma hasarlarına neden olur.

Tekrarlı yükler neticesinde zamana bağlı olarak malzemede mikro çatlaklar şeklinde başlayan deformasyon, ilerleyen aşamalarda makro çatlaklara ve nihayetinde malzemenin kırılmasına neden olur. Tekrarlı ya da sabit yüklemeye maruz kalmış bir malzemenin yorulma ömrü, kırılma öncesine kadar ulaştığı çevrim sayısı ile ifade edilir ve çevre koşulları (sıcaklık, rutubet içeriği vd.), örnek türü, örneğin kusur barındırma durumu ve geometrik özellikleri, yüklemenin çevrim hızı ve yükleme gerilmesi, tersine yükleme gibi birçok değişkene bağlıdır [32].

1.2. MALZEME MUAYENESİ

Muayene, herhangi bir şeyin gözden geçirilmesi, araştırılması, kontrol edilmesi amacıyla göz, el gibi duyu organları ile ve/veya makine-teçhizat ile varsa standartlara uygun olarak yapılan incelemeye denir. Fakat duyu organları ile gerçekleştirilen muayenelerde malzemenin iç kusurları belirlenemez. Dolayısı ile incelemede makine-teçhizata ya da nüfuz edici solusyonlara gerek duyulur. İnceleme tahribatlı ve/veya tahribatsız olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilir.

1.2.1. Tahribatsız (Dinamik) Muayene

Malzeme odaklı düşünüldüğünde muayene, kullanım yeri ve amacına uygun malzeme seçimi yapma, seçilen malzemenin teknolojik, kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini ve gereksinimi karşılayacak en düşük ölçüleri belirleme amacıyla belirli standartlar ve formüller aracılığı ile gerçekleştirilen deney ya da deneyler bütünü olarak tanımlanabilir. Bu deneyler, malzeme üzerinde geri dönüşü olmayan deformasyonlara neden oluyor ise “tahribatlı” olmuyor ise “tahribatsız” muayene olarak adlandırılır. Deformasyon, malzemenin tüm özelliklerine etki etmese bile kullanım amacı ve yeri için gerekli olan özellikleri değiştirdiğinde malzeme kullanılamaz hale gelir. Bu bakımdan tahribatsız muayene, parça zayıflığına neden olmaz ve genellikle nihai parçalara ya da mevcut kullanımdaki parçalara uygulanır. Zira parça üzerinde herhangi bir hasar ya da iz oluşturmaz. Fakat bu muayenede elde edilen verilerin geçerliliği, muayene edilen malzemeye ait tahribatlı muayene sonuçları ile karşılaştırılarak sağlanmalıdır. Bu verilerin olmaması durumunda tahribatsız muayene sonrasında tahribatlı muayene gerçekleştirilip sonuçların tutarlılığı incelenmelidir. Muayenede süreksizlik önemli bir ölçüttür ve bir malzemenin gerek iç gerekse de dış yapısında ya da yüzeyinde süreklilik aranır. Tahribatsız muayene eğer malzemede var ise bu süreksizlikleri, hata ve kusuru tespit etmek için kullanılır. Ağaç malzeme süreklilik konusunda diğer malzeme türlerinden büyük farklılık gösterir. Coğrafi koşullar, aynı cins olsa bile ağaç malzeme özelliklerine büyük etki eder. Dolayısı ile ağaç malzemenin tahribatsız yöntemle muayenesi diğer malzemelere göre daha zordur denilebilir. Bu zorluklara rağmen tahribatsız muayene, orman ürünlerinin kusur tespitinden sınıflandırılmasına kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Odunun ön işlemden sahadaki kullanım aşamasına kadar tahribatsız muayenenin ya da değerlendirmenin kullanım çeşitlenmesi Çizelge 1.2’de görülmektedir [95], [96].

Çizelge 1.2. Odun ürünlerin tahribatsız değerlendirmesinde fırsat ve gereklilikler.

Malzeme Özelliği		Ön İşlem	İşlem	Ürün	Saha
Kusur	Yüzey	X	X	X	X
	İç	X			X
Temel Özellikler	Lif doğrultusu	X	X		
	Yoğunluk	X	X	X	
	Rutubet İçeriği	X	X	X	X
	Direnç / Katılık			X	X
	Permeabilite/Difüzyon		X	X	
	Yüzey Pürüzlülüğü		X	X	
Geometri	Profil / Şekil	X	X	X	
	Kalınlık		X	X	
Yapışma Kalitesi	Kompozitler		X	X	
	Lamine Malzemeler		X	X	X
	Bağlantı Elemanı			X	X

X: tahribatsız karakterizasyonun gerekli olduğunu belirtir.

Tahribatsız muayene, büyük olasılıkla ilk kez 1. Dünya Savaşı esnasında kullanılan ahşap yapılu uçaklardaki kazein ya da süt proteini gibi organik tutkallar ile gerçekleştirilen tutkallı birleştirmelerin güvenilirliğini derinlemesine incelemek amacıyla kullanılmıştır [97]. Galligan ve McDonald [98]'a göre de tahribatsız muayene, 1960'larda ortaya çıkan ve birçok türü olan, gelişen teknoloji ile kullanımı yaygınlaşan bir uygulamadır. Carcangiu vd. [99]'ne göre odun gibi homojen olmayan malzemelerin karakterizasyonu için gerekli olan teknolojik gelişmeler, metal gibi homojen olan malzemeler için gerekli olan gelişmelere oranla çok daha yavaştır. Bu yavaşlık, malzeme özündeki homojen olmayan yapının, soruna getirilmek istenen teorik ve teknolojik çözümü zorlaştırmasından kaynaklanmaktadır.

En yaygın kullanılan tahribatsız muayene türleri; manyetik parçacık, radyografi, uzaktan görsel inceleme, sıvı emdirme, elektromanyetik endüksiyon, girdap akımları testi, interferometri ve ultrasonik muayenedir [100]. Bunun dışında, mikrodalga, akustik emisyon, akustik mikroskopi, lazer girişimölçeri, termografi, akı kaçağı ve replikasyon gibi yöntemler de mevcuttur. Odunun fiziksel özelliklerinin tahribatsız yöntemlerle sınıflandırılmasında kullanılan yöntemler ise Çizelge 1.3'de gösterilmiştir [96], [101].

Çizelge 1.3. Odunun tahribatsız sınıflandırma yöntemleri.

Odun Parametresi	Ölçülen Özellik	Ölçüm Tekniği
Rutubet İçeriği	Dielektrik	Empedans DC ve yüksek frekans, mikrodalga, kızılötesi ve NMR
	Termal	İnfrared
	İyonize-ışın absorpsiyonu	X-ışını; gama ışınları
	Elastik	Frekans rezonans, ultrasonik
Yoğunluk	Ağırlık	Gravimetrik yöntem
	İyonize ışınlar	X-ışını mikrodensitometre, beta ve gama ışınları
	Dielektrik	Mikrodalga tekniği
	Mekanik	Pilodyne
Lif Doğrultusu	Elastik	Ultrasonik ses hızı
	Dielektrik	Mikrodalga
	Işık saçılımı	Lazer, görünür ışık
	Termal	Kızılötesi
Budak Tespiti	Optik	CCD kamera, kolorimetri
	Elastik	Ultrasonik BT
	İyonize radyasyon	X-ray BT, gamma ışını BT
	Termal	İnfrared veya lazer termografi
	Elektrik	Mikrodalga, NMR
Çürük Tespiti	Elastik	Vibrasyon, ultrasonik
	Mekanik	Pilodyn penetrasyonu
	Dielektrik	Mikrodalga
	İyonize radyasyon	X-ray BT
Mekanik Kapasite	Statik	Eğilme gerilimi sınıfı, deneysel yük
	Dinamik	Vibrasyon ve ultrasonik
	Akustik	Akustik emisyon

Odunun mekanik özelliklerini de içeren birçok özelliğini belirlemede kullanılan tahribatsız test yöntemleri, Niemz [102] tarafından Çizelge 1.4'de detaylı bir şekilde tasnif edilmiştir. Burada odunun elastik sabitlerinden Young's modülü (E) ve kesme modülü (G)'nün akustik ses hızı ile ölçülebildiği belirtilmiştir.

Çizelge 1.4. Odunun tahribatsız testinde kullanılan yöntemler.

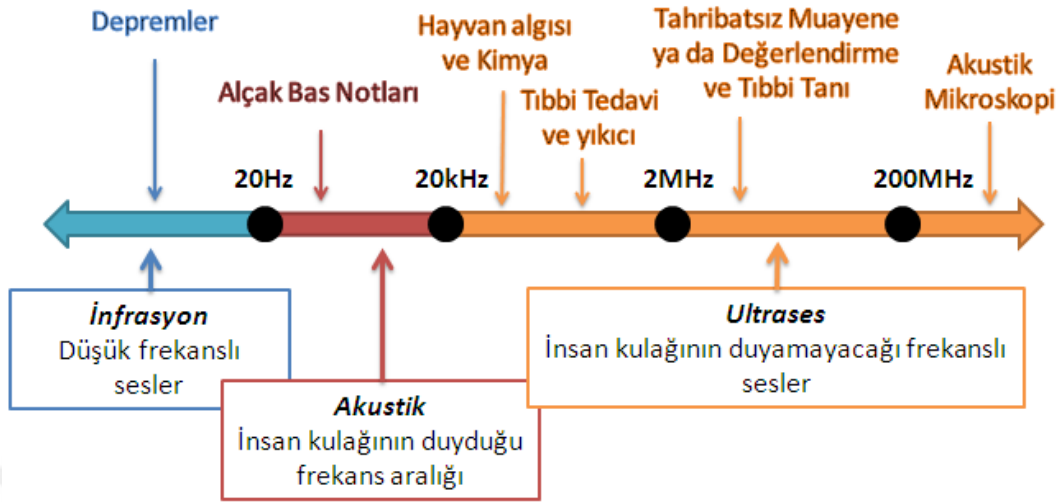
Özellik	Temel Fiziksel Prensipler	Ölçülebilir Özellikler
Mekanik	Delinme direnci, Sertlik, İntrüzyon davranışı	Mantar çürüklüğü, yoğunluk
Elektriksel	Elektrik direnci	
	Rutubet içeriği ile elektrik direnci arasındaki ilişki	Rutubet içeriği
	Mantar çürüğü ile elektrik direnci arasındaki ilişki	Mantar çürüğü tespiti
	Dielektrik özellikler	Rutubet içeriği
Akustik	Ses hızı; ses yansımaları, ses azalması	Elastik özellikler (E, G) ve kusur tespiti
	Akustik emisyon	Mikro çatlaklar, böceklerin kemirme sesi/gürültüsü
	Eigenfrequency	Elastik özellikler (E, G) ve tutkallı odun birleştirmelerin delaminasyonu
Termal	Isı ışıınımı (termografi)	Yakın yüzey alan kusuru (iç katman adezyon kusuru, açık füğ) tespiti
Partikül	Nötron ışıınımı	Nem dağılımı ya da dağıtımı
Elektromanyetik dalgalar	Görünür ışık (yaşlandırma-olgunlaş(tır)ma)	Renk ölçümü, yaşlandırma, renk farklılığı, video imaj ilişkisi
	IR/NIR ışıınımı	Nem, kimyasal analiz (safsızlık), kısmi mekanik özellikler
	X-ışıını (absorbsiyon/difüzyon)	Yoğunluk, lokal yoğunluk dağılımı, yıllık halka profili, S2 tabakası açısı
	Senkrotron ışıınımı	Mikro-strüktür analizi

Tahribatsız muayene, genel olarak Ar-Ge faaliyetleri, üretim yönetimi, kalite kontrolü, yaşam döngüsündeki kullanım aşınmalarını belirlemek amacı ile gerçekleştirilir.

1.2.1.1. Ultrasonik Muayene

Ultrasonik (ultrasonic) terimi, insan için duyulabilir aralığın üst limitinden daha yüksek frekanslara sahip titreşim, ses dalgaları için kullanılmaktadır. Bu titreşimlerin frekansı,

Şekil 1.9’de görüldüğü üzere 20kHz’den daha yüksektir. Sonik terimi, çok yüksek genlikteki ultrason ya da ultrases (ultrasound) dalgalarına uygulanmıştır [103].

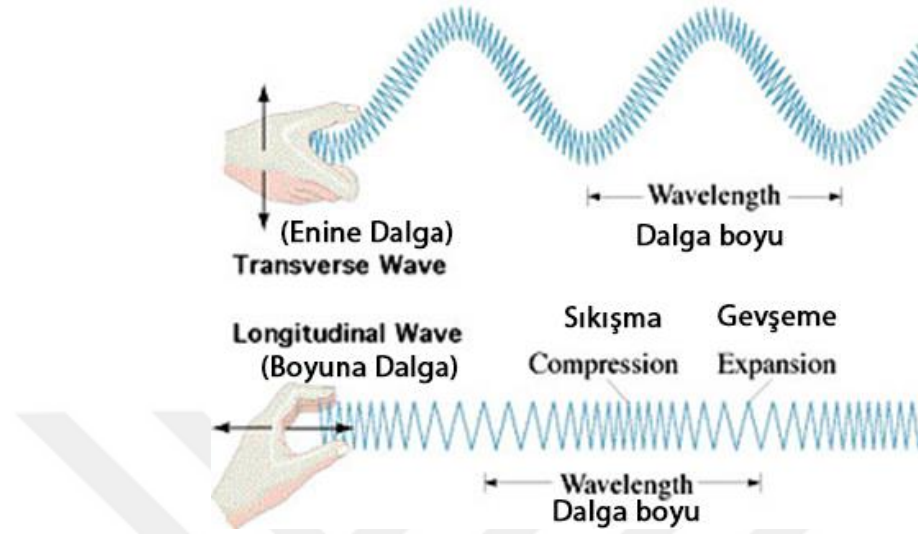


Şekil 1.9. Ses dalgalarının yaklaşık frekans spektrumu ve bazı uygulamalar.

Ultrasonik tahribatsız muayene (USNDT-Ultrasonic Non-destructive Testing), elastik dalgaların katılardaki tahriki, yayılımı ve saçılımı temeline dayanır [104]. Ultrasonik dalgalar, malzeme içerisinde transdüserlerin oluşturduğu hüzmeye boyunca ilerler. İlerleme esnasında malzeme içerisinde boşluk, çatlak, yoğunluk farkı, çürük bölge gibi süreksizlikler ya da farklı özellikler gösteren bölgeler, dalga yayılımında, şiddetinde ve rotasında değişimler meydana getirerek sinyal okuyucu ekranda anlamlı veriler ya da grafikler oluşturur. Bu sayede kusur tespiti gerçekleştirilmiş olur. Kusursuz örneklerde ilerleyen dalgalarla da malzeme özellikleri belirlenmiş olur. Ultrasonik ölçümlerde kullanılan transdüserler, uygulanan enerjiyi bir formdan başka bir forma dönüştüren ve amacına uygun olarak değiştirilebilen cihazlardır. Ultrasonik muayenede uygulanan elektrik sinyali, bu cihazlar aracılığı ile belli genlik ve frekansa sahip ses dalgaları halinde iletilirler. Bu iletim, farklı dalga şekilleri ile gerçekleşir. Ağaç malzeme özelliklerini ölçmede kullanılan temel dalga tipleri, yığın (longitudinal ya da transverse-shear) ve yüzey (Rayleigh, Lamb ve Love) dalgalarıdır [105].

Ultrasonik muayenede en yaygın kullanılan dalga türleri, Şekil 1.10’da görüldüğü üzere boyuna (longitudinal) ve enine (transverse) dalgalarıdır [106]. Enine dalgalar, kesme dalgası olarak da adlandırılır çünkü parçacık titreşim yönü, dalga yayılım yönünde dik ya da çaprazdır. Ayan [107] boyuna ve enine dalgaların özelliğini sırası ile “*Titreşen parçacık, dalganın yayıldığı doğrultuya paralel olarak hareket ettiği zaman oluşur.*” ve

“Parçacık, yayılma doğrultusuna dikey olarak titreştiği anda ortaya çıkan dalgalara denilmektedir. Bu türde boyuna dalgaların tersine, basınç oluşturan kuvvet, yayılma doğrultusuna dik etki etmektedir.” şeklinde belirtmiştir.



Şekil 1.10. Boyuna ve enine dalgaların yayılım özelliği [108].

Endüstriyel tahribatsız değerlendirmede kullanılan ultrasonik dalgalar, yapısal malzeme ya da bileşende ilerler ve mevcut olan çatlak gibi kusurları tespit etmeye odaklanır [109].

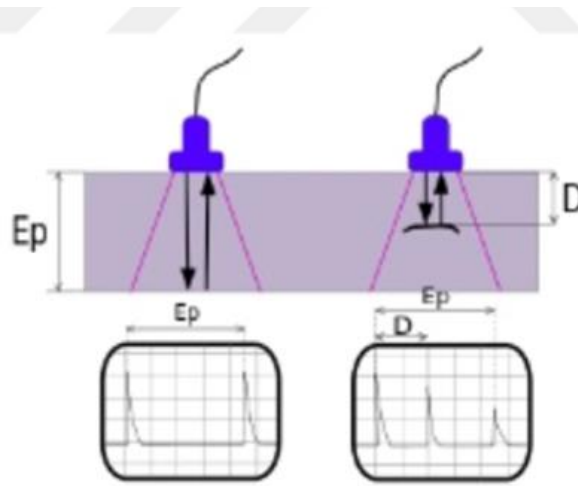
Ultrasonik yöntemle tahribatsız muayene, yarım yüzyıldan uzun bir süredir gerçekleştirilmektedir. İkinci dünya savaşı sonrasında malzemelerin ultrasonik testi, enstrümanların gelişmesi ile mümkün olabilmiştir. Katı maddelerin ses dalgalarının iletiminde iyi olması bu yöntemin temelini oluşturmuştur. Ses dalgalarının malzeme ile etkileşim etkisi, dalganın daha yüksek frekansı anlamına gelen daha küçük dalga boyları ile daha güçlü olmaktadır. Bu bakımdan ultrasonik dalgalar, 0,5-25MHz frekans aralığında kullanılmak zorundadır. Zira düşük frekanslarda, dalganın içsel kusurlar ile etkileşim etkisi çok düşük olacak ve bu da kusur tespitinin kuşku olmasına neden olacaktır. Radyografi ve ultrasonik test, içsel kusurların tespitinde en yaygın kullanılan yöntemlerdendir [110].

Ultrasonik teknikler, herhangi bir malzemenin tüm elastik özelliklerinin tahribatsız ölçümü için uygun olan yöntemlerdendir [111]–[113]. Fakat ince katmanlı kompozit malzeme ya da yapıların ultrasonik karakterizasyonu, yansıyan sinyallerin aşırı derecede çakışması nedeni ile zor olabilmektedir [114].

Ultrasonik testlerde en yaygın kullanılan yöntemler, gönderici ve alıcının malzemenin karşılıklı yüzeylerine yerleştirilmesi ile sağlanan doğrudan iletim [115] ve darbe-yankı

(pulse-echo) tekniğidir [99]. Aziz vd. [116]'ne göre odun gibi kaba lifli ve poroz malzemelerin ultrasonik testi için doğrudan iletim yöntemi pulse-eko yöntemine göre daha uygundur. Puls-eko yönteminde gönderilen ses dalgalarına ait ekolar, kusurun yerini ve paralel yüzeyle malzemenin kalınlığını belirlemede kullanılır (Şekil 1.11).

Ultrasonik testin temelinde yüzey temaslı ya da temassız doğrusal ya da açısız yayılım yapan problar vardır. Probdan gönderilen sinyaller, malzemenin içinde ilerler ve malzeme içinde süreksizlik olması durumunda Şekil 1.11'de D ile gösterilen mesafedeki süreksizlikten yansıyarak geri dönerken süreksizlik olmaması durumunda E_p ile gösterildiği gibi geri döner. Dolayısıyla elde edilen yansımalar ile malzeme muayene edilir. Bazı durumlarda iç kusurun yönü gönderilen sinyalin farklı açılarda yansımaya ve sinyalin alınmamasına neden olur. Bununla beraber yüzeyde olan ve içe doğru dik ilerleyen bir çatlak, açılı yayılım yapan proba yapılan muayenede istenilen başarının elde edilmesine engel olabilir. Ses hüzmesi olarak adlandırılan ses dalgasının yayılım yaptığı doğrultu, ultrasonik testin efektif test bölgesini belirler. Ses hüzmesi, yakın alan ya da uzak alan olmak üzere kabaca ikiye ayrılabilir. Bu alanlar, transdüser ya da probun çapına, frekansına ve test edilen malzemenin hızına bağlıdır. Merkezi hüzme ise akustik aks olarak adlandırılır [110]. Ses hüzmesi, ses yolu olarak da adlandırılabilir.



Şekil 1.11. Kusur olması veya olmamasındaki darbe-yankı yansımaları [116].

Genellikle dikey süreksizliklerin olduğu kalın duvarlı test objelerinde yansıyan ses dalgaları, proba geri gelemez. Bu durumda ikinci bir prob kullanılarak süreksizliklerin belirlenmesi sağlanır. Tandem teknik de denilen bu uygulamada bir probe gönderici diğer probe ise alıcı olarak çalışır. 30mm kalınlığa kadar olan örneklerde açılı tarama ya da sinyal gönderimi süreksizliklerin belirlenmesinde hataya neden olabilir. Bu durumda tek problu tarama gerçekleştirilmesi önerilir [110].

Test objesinin yapısına ve özellikle de kullanılan probun dalga yayılım modu ve kullandığı frekansa bağlı olan ses azalması, ultrasonik ölçümlerde önemli bir parametredir [110].

Steinkamp [117]'a göre odun örnekleri sonsuz homojen izotropik malzeme olarak değerlendirilebilir. Krautkraemer ve Krautkraemer [118]'e göre ultrasonik testin en eski kullanımlarından biri Czerlinsky [119] tarafından kontraplakların yapışma testinin gerçekleştirilmesidir. Bucur [105]'a göre odunun lif açısının ultrasonik ses hızı yöntemi ile tahribatsız olarak tahmin edilmesine dikkati çeken ilk kişinin Lee [120] olduğunu belirtmiştir. Ultrasonik muayene ile üretim sırasında ağaç malzemelerin kalite kontrolü, budak, çatlak tespiti ve bunların yeri ve yoğunluğu, fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ile kalite tayini, direnç özellikleri belirlenmesi gerçekleştirilebilmektedir [116], [121]. Fakat lif yönelimi nedeni ile meydana gelen anizotropi, ağaç malzemenin genel kalite testinin ses hızı ölçümü ile yapılmasını zorlaştırmaktadır [118].

Esteban vd. [122] ultrasonik yöntemin pratik kullanımından dolayı diğer tekniklere göre daha avantajlı olduğunu belirtmiştir. Ultrasonik testin diğer tahribatsız yöntemler ile kıyaslandığında avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibidir [123], [124].

Avantajları;

- Hem yüzey hem de yüzeyaltı süreksizliklere hassastır.
- Kusur belirlemede penetrasyon derinliği diğer tahribatsız yöntemlere göre çok daha iyidir.
- Darbe-yankı tekniği kullanıldığında sadece tek taraflı/yanlı erişim/temas gereklidir.
- Yansıtıcı konumunu, boyutunu ve şeklini çok net bir biçimde belirleyebilmektedir.
- Minimum parça hazırlığı gerektirir.
- Anında elde edilen sonuçlar sağlar.
- Otomatik sistemler ile detaylı resimler oluşturulabilmektedir.
- Test edilen malzemeyi etkilemediği gibi yakınındakilere ya da testi gerçekleştirenlere tehlike oluşturmaz.
- Kusur tespitinin yanında kalınlık ölçümü gibi farklı amaçlar için de kullanılabilir.
- Kullanılan ekipmanlar, yüksek oranlı otomatize olabilmemesinin yanında

taşınabilirdir.

- Karmaşık geometrik cisimlerde kullanılabilir.
- Hemen hemen tüm malzemelerde kullanılabilir.
- Güvenlidir.

Dezavantajları;

- Yüzeyle ultrasonik yayılım için uygun olmalıdır.
- Beceri ve eğitim, diğer yöntemlere göre daha yoğun ve kapsamlıdır. Dolayısıyla sinyal yorumlama uzmanlık gerektirir.
- Normalde ses enerjisini test örneğinden geçirebilmek için temas maddesine ihtiyaç duyar.
- Kaba, düzensiz şekilli, çok ufak, oldukça ince ya da homojen olmayan malzemelerin muayenesi oldukça zordur.
- Dökme demir ya da kaba lifli-damarlı malzemelerin muayenesi düşük ses iletimi ve yüksek sinyal gürültüsü nedeni ile zordur.
- Ses hızına paralel doğrultulu doğrusal kusurlar belirlenemeyebilir.
- Hem donanım kalibrasyonu hem de kusur karakterizasyonu için referans standartlara gerek vardır.
- Yüzeyde boya vb. maddelerin olmaması gerekir.
- Temaslı ölçümlerde temas maddesi kullanımı gerektirebilir. Subazlı temas maddesi kullanımında, temas maddesinin malzemeye penetre olması ölçümlerde hataya neden olabilir.
- Yüksek maliyetli bir yöntemdir.

1.2.1.2. Sıvı Emdirme

Sıvı emdirme yönteminde, malzeme üzerinin süreksizliğini kontrol için yüzey iyice temizlendikten sonra yüzeye yüzey ıslatma özelliği yüksek olan bir sıvı dökülür ve yüzeyde bulunabilecek çatlak, damar, gözenek gibi süreksizliklere nüfuz etmesi beklenir. Yüzey, penetrant sıvıdan temizlenir ve penetrant sıvıyı nüfuz ettiği çatlaktan dışarı çıkartarak görünür hale getirecek geliştirici yüzeye uygulanır. Sonrasında emdirilen sıvının görülebilme özelliğine göre (UV ile görülebilen florışıl penetrant, beyaz ışıkta görülebilen renkli boyalı penetrant veya ikisi birden) uygun ışık altında test parçasının yüzeyi kontrol edilir. Muayene sonrasında malzemenin temizlenmesi gerekebilir. Sıvı emdirme yönteminin olumlu ve olumsuz yönleri mevcuttur [125].

Olumlu yanları;

- Kolay uygulanabilir.
- Genel olarak malzeme sıkıntısı yoktur.
- Hızlı ve ekonomik bir uygulamadır.
- Niceldir.

Olumsuz yanları;

- İç kusurların tespitinde kullanılamaz
- Aşırı pürüzlü ve gözenekli malzeme yüzeyleri için uygun değildir.

Dolayısı ile bu yöntem ağaç malzeme gibi malzemeler için uygun olmamakla birlikte az gözenekli metalik malzemeler ya da kimyasal reaksiyon riski olmayan ametal malzemeler için uygundur [125].

1.2.1.3. Manyetik Parçacık

Ferromanyetik özellik gösteren malzemelerin yüzey ve yüzeye yakın yerlerindeki kusurların hızlı, basit ve ekonomik bir şekilde tespit edilmesini sağlayan tahribatsız muayenedir. Manyetik akım yöntemi ile boyuna, rastgele yönlenmiş ve 45° açılı çatlaklar tespit edilebilirken enine çatlak tespit edilemez. Bu durum, manyetik alanın polarizasyonu ile çatlağın polarizasyonunun paralel olması durumunda kusur tespitinin yapılmayacağını ifade eder. Manyetik parçacık yönteminin olumlu ve olumsuz yanları aşağıdaki gibi özetlenebilir [125].

Olumlu yanları;

- Kolay uygulanır.
- Niceldir.
- Görüntüleme aşaması hariç otomasyona elverişli bir uygulamadır.

Olumsuz yanları;

- Sadece ferromanyetik özellik gösteren malzemeler test edilebilir.
- Çok derin kusurların tespitinde başarılı değildir. Dolayısıyla yüzey ve yüzeye yakın kusurları tespit edebilir.
- Çok pürüzlü yüzeylerde uygulama başarısı düşüktür.
- Yüzeydeki ferromanyetik olmayan boya, kaplama vb. katmanlardan etkilenir.
- Büyük parçalar için çok yüksek mıknatıslama akımları gerekebilir.

1.2.1.4. Radyografi

Malzeme içerisinde X veya gama ışını kaynaklarıyla gerçekleştirilen elektromanyetik ışınım, malzemenin diğer yüzeyindeki ışınım duyarlı film üzerine malzemenin içyapısı, kusurları vb. özelliklerine bağlı olarak grafik oluşturur. Kusursuz ve homojen malzemedeki geçen ışınlar tek tonlu bir grafi oluştururken kusurlu malzemedeki geçenler homojen olarak zayıflamaz ve film üzerinde daha yoğun etki yaparak tonlama farkı ile homojen olmayan farklı tonlara sahip görüntüyü oluştururlar. Etki yoğunluğundaki farklar, grafi üzerinde hata türü belirlemede ve hatayı yorumlamada anlamlıdır. Bununla birlikte dijital radyografi denilen ve görüntü oluşturmada sezgeçlerin kullanıldığı yöntem de mevcuttur. Bu yöntemde elde edilen dijital çözümü, film yerine katot ışını tüpü, sıvı kristal, ışık yayan diyot ya da herhangi tip ekran ile görselleştirilir [100].

1.2.1.5. Girdap Akımları

Bu yöntem ile malzemedeki süreksizliklerin belirlenebilmesi için malzemenin elektrik iletkenliğine sahip olması gerekir. Girdap akımları, bir bobine uygulanan alternatif akımın kondüktif bir malzemeye yaklaştırılması sonucu bobindeki değişken manyetik alanın malzeme yüzeyinde endüksiyon akımları oluşturması ve bu akımların kapalı bir devre olarak davranması prensibine göre çalışan yöntemdir. Malzeme yüzeyinde olası bir süreksizlik durumunda elektrik direnci farkı meydana gelecek ve akımların yörüngelerinde farklılık oluşacaktır. Bu yöntemin ilk uygulaması, 1926'da geliştirilen cihazla malzeme kalınlığı ölçümü olmuştur [100].

1.2.1.6. Gözle Muayene

Göz ile muayene, en eski sayılabilecek yöntemdir zira herhangi bir teçhizata, teknolojiye gerek duyulmadan sadece görme organı ile yapılabilecek basit fakat yüzeysel bir muayene şeklidir. Fakat çok küçük obje ya da kusurların incelenmesinde büyüteç ve direk gözle ulaşamayacak noktaların görsel incelenmesinde fiberoskop ve boroskop gibi optik aletler göz ile muayenede kullanılabilen teknik donanımlardır. Gözle muayene yöntemi, yapısal ahşap elemanların tahribatsız muayenesinde kullanılan en eski yöntemdir [105] ve günümüzde bile kereste, kontrplak gibi ürünlerin sınıflamasında ve bu ürünlerin biyolojik degradasyonunu tespit etmede yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [96]. Gözle muayenede malzeme yüzeyine gelen ışığın yönü ve şiddeti hataların görünmesi açısından önemlidir. Dolayısı ile yeterli ve uygun ışık altında ve doğru gözlem açısı ile muayene gerçekleştirilmelidir.

1.2.2. Tahribatlı (Statik) Muayene

Tahribatlı muayene, ilgili standardın belirttiği malzeme, ölçü, teçhizat ve uygulama adımları kullanılarak yük altında malzemenin temel özelliklerini değiştiren ve genellikle test örneklerinde deformasyonlara neden olan test yöntemleridir. Bu deformasyonlar, elastik ve plastik deformasyon olarak ikiye ayrılabilir. Elastik deformasyon, yükün kaldırılması sonucu malzeme özelliklerinin geri dönebildiği elastik davranış sınırları içerisinde gerçekleşir. Plastik deformasyonda ise uygulanan yükün kaldırılması sonucu malzeme özellikleri geri döndürülemez ve hasarlar kalıcı hale gelir. Bu durum, akma noktasından sonra meydana gelir ve Şekil 1.3’de görüldüğü gibi sünek (düktil) ve gevrek (fajil) malzemelerde farklı davranışlar sergiler. Gevrek malzemelerde belirgin bir akma davranışı gözlenmez. Plastik deformasyon, Şekil 1.3’deki A noktasına kadar olan doğrusal davranış eğrisinin %0,2 ofsetlenmesi ile elde edilen akma gerilmesi noktasından sonra meydana gelir. Malzeme, bu iki nokta arasında elasto-plastik bir davranış sergiler. Fakat çok farklı mekanik davranış sergileyen malzemeler de mevcuttur. Elastik, elastoplastik, viskoelastik cisimler bunlara örnektir.

Odunun tahribatlı muayenesinde statik, dinamik, yorulma ve değişken yükleme ile testler gerçekleştirilmektedir [126]. Bu testlerde kullanılacak kusursuz örnekler, ilgili standartlarda belirtilen ölçülerde hazırlanır, boyut ve şekil olarak çok farklılık gösterir. Bu testler sayesinde elastik, plastik ve direnç özellikleri belirlenir. Ağaç malzemenin tahribatlı muayenesinde en yaygın kullanılan test yöntemleri, fiziksel özelliklerde rutubet miktarı ve yoğunluk belirleme, teknolojik özelliklerde sertlik iken mekanik özelliklerde basma, çekme, eğilme vb. gibi testlerdir [126]. Kesme modülünün belirlenmesinde, normal ya da eksen dışı basma ve çekme, üç ya da daha çok noktalı eğilme, burulma, Iospescu, Arcan, blok kesme, düzlem içi kesme, tek küp aparatı gibi çok farklı test yöntemleri kullanılmaktadır. Kesme testi esnasında örnekte meydana gelen gerilme-şekil değiştirme verileri, temasız (vidyo) ya da temaslı ekstensometre ve strengçe gibi teknik ekipmanlar sayesinde ölçülebilmektedir.

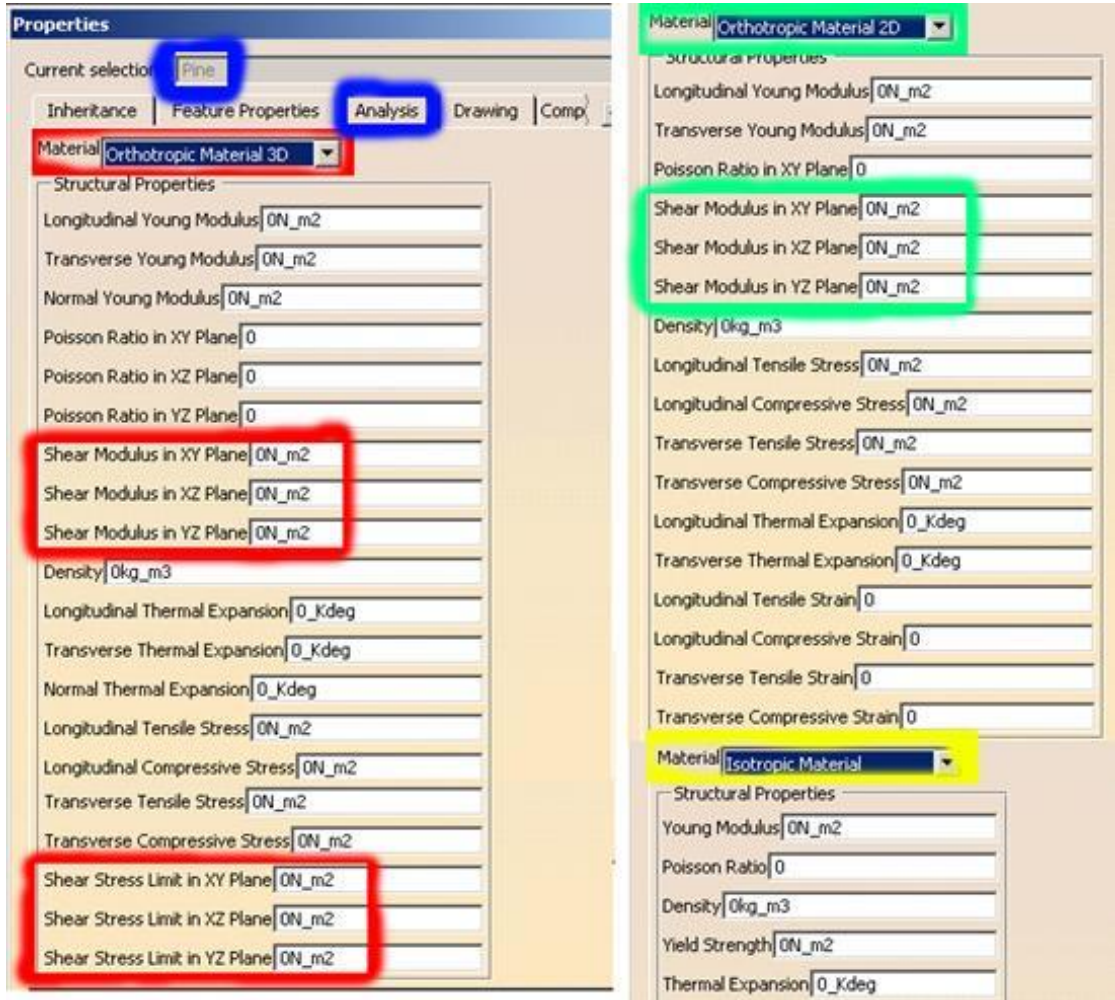
1.3. LİTERATÜR ÖZETİ

Ağaç malzeme, doğal haliyle veya mühendislik işlemleri sonrasında gerek yapısal, gerek dekoratif gerekse de enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan yenilenebilir önemli bir kaynak türüdür. Bozkurt ve Erdin [21]’e göre 70000 odunsu bitkiden oluşan

bu kaynağın ticarete konu olan türleri yaklaşık olarak sadece 400'dür ve bu kaynak giderek artan talebi karşılamada yeterli değildir. Bu talebin sürdürülebilir bir şekilde karşılanabilmesinde mühendislik faaliyetleri önemli bir yer tutmaktadır. Bu faaliyetlerden bazıları; yeni ürün geliştirme, doğal ahşabı modifiye edip ömrünü uzatma, kullanım yeri ve amaca uygun tasarımlar gerçekleştirme, bakım ve onarım faaliyetleridir. Gelişen bilgi teknolojileri ile tasarım yazılımları ve değerlendirme araçları, kullanım yeri ve amacına uygun tasarımların yapılabilmesine hiç olmadığı kadar destek sağlamaktadır. Bu destek en yaygın olarak bilgisayar destekli tasarım (BDT, Computer Aided Design-CAD) yazılımları ile genellikle tasarım işlemi için sağlanmaktadır. Fakat statik ya da dinamik yüklere maruz kalan ahşap yapı elemanlarının bu yöntemle tasarımının yanında değerlendirilmesi de gerekmektedir. Günümüzde bilgisayar destekli mühendislik (BDM, Computer Aided Engineering-CAE) değerlendirmeleri SEA gibi sayısal yöntemlerle gittikçe artmaktadır [127] fakat modellemenin gerçeğe yakın sonuçlar verebilmesi için malzemenin anizotrop ya da ortotrop olarak modellenmesi ve doğrusal olmayan analizlerin yapılması gereklidir. Zira Bodig ve Jayne [36] ve Schniewind ve Barrett [87]'a göre ağaç, ortotropik malzeme simetrisine sahip bir malzeme olarak değerlendirilmelidir. Zira odunun L, R ve T olmak üzere üç temel yönünün birbirine dik oluşturduğu LR, LT ve RT düzlemleri vardır. Bu düzlemlerin simetrisi de vardır ve birbirine dik üç simetri düzlemi olan malzemeye ortotropik yani ortogonalli anizotropik malzeme denir [128]. Odun gibi ortotrop yapıya sahip malzemelerin L, R ve T yönlerindeki ve bunların oluşturduğu düzlemlerdeki maddesel özellikler birbirinden farklıdır [31]. Şekil 1.12'de görüldüğü üzere malzeme izotropik olarak modellendiğinde sadece beş parametre gerekirken ortotropik olarak modellendiğinde yirmi parametrenin bilinmesi gerekmektedir. Mihailescu [129], Guan ve Rodd [130], [131] odunun davranışını, ortotropik malzeme özellikleri kullanarak oluşturduğu modeli SEY'de inceleyerek ortaya koymuştur. Bodig ve Jayne [36]'ye göre odunun ortotropik elastik davranışının tam olarak belirlenebilmesi için elastikiyet (Young's) modülü (E_L, E_R, E_T), kesme modülü (G_{LR}, G_{LT}, G_{RT}) ve Poisson oranı ($\mu_{LR}, \mu_{RL}, \mu_{LT}, \mu_{TL}, \mu_{RT}, \mu_{TR}$) olmak üzere 12 adet elastik sabite gereksinim duyulmaktadır. Fakat simetriden dolayı ortotropik yapı malzemelerde elastik sabit sayısı dokuza düşer [128] ve elastik sabitlerden biri olan kesme modülü, odunun mekanik özelliklerini belirten birçok göstergeden biridir [132].

Dolayısı ile ağaç malzeme davranışının gerçeğe yakın olarak belirlenebilmesi için Şekil 1.12’de görülen kesme modülü ve kesme gerilme sınırı değerlerinin de belirtildiği üç boyutlu ortotropik malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Ve şekilde görüldüğü üzere genellikle bu bilgiler, bilgisayar destekli analiz yazılımlarının kütüphanelerinde özellikle odun türleri için tam anlamı ile mevcut değildir.

Gerek izotropik gerekse de anizotropik malzemelerin kesme modülünün de içinde olduğu elastik sabitlerin belirlenmesinde kullanılan yöntemler genellikle statik ve dinamik olmak üzere iki sınıfa ayrılır [133].



Şekil 1.12. CATIA V5 ile modellemede odun parametreleri.

Bazı masif ağaç malzemelerin kesme modülü değerleri, Çizelge 1.5’de görüldüğü gibi belirtilmiştir.

Çizelge 1.5. Bazı odun türlerinin kesme modülleri

Tür	Yoğunluk (kg/m ³)	Kesme Modülü (N/mm ²)		
		G ₄₄ =G _{RT}	G ₅₅ =G _{LT}	G ₆₆ =G _{LR}
Balsa [134]	200	30	200	310
Amerikan Laleağacı [134]	380	110	670	720
Huş [134]	620	190	920	1180
Meşe [134]	660	390	760	1290
Dişbudak [134]	670	270	890	1340
Kayın [134]	750	460	1060	1610
Sıtka Ladini [134]	390	39	720	750
Sıtka Ladini [135], [136]	480	46	1200	-
Sıtka Ladini [135], [136]	460	27	510	-
Ladin [134]	440	36	770	750
Ladin [135], [136]	480	62	820	-
Ladin [135], [136]	440	44	650	-
Ladin [137]	540	40	-	-
Ladin [137]	450	45	-	-
Ladin [138]	470	55	-	-
Kırmızı Ladin [135], [136]	480	37	540	-
Kırmızı Ladin [135], [136]	450	42	640	-
Beyaz Ladin [135], [136]	480	45	740	-
Beyaz Ladin [135], [136]	460	53	690	-
Douglas Göknarı [134]	450	88	880	880
Göknar [134]	450	140	750	930
Sarıçam [134]	550	66	680	1160
Akçaağaç [135], [136]	750	89	1700	-
Gümüşi Akçaağaç [135], [136]	760	49	1300	-
Hint Gülağacı [135], [136]	790	880	2700	-
Brezilya Gülağacı [135], [136]	830	920	3000	-

Sadece eş dağılım gösteren kesme gerilmesini içeren kesme testleri geliştirmek için yıllardır birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [139]–[142]. Çünkü ağaç malzeme gibi homojen olmayan malzemelerin kesme modülü ve kesme direncinin hesaplanabilmesi için homojen bir gerilme alanı gereklidir. Bunun için birçok çalışma kesme gerilmesinin normal basma, eğilme, çekme gerilmeleri ya da bükülme gerilmelerine anlamlı bir etkisi olmadan istenilen düzleme nasıl yüklenebileceği üzerinde durmuştur.

Vazquez vd. [143] eğilme testinin, sadece L yönü elastikiyet modülü değerlerini içerdiğini ve bu nedenle elastik parametrelerin karşılaştırılabilmesi için basma testinin yapılması gerektiğini belirtmiştir. Onaran [18] elastik sabitlerin genellikle çekme ve basmada eşit olduğunu belirtmiştir. Sliker vd. [144] on sert ağacın ortotropik elastik sabitlerini basma testi ile ölçmüştür.

Iosipescu ve eksen dışı (off-axis) çekme testi [145]–[149] gerçek malzeme özelliklerine muhtemelen çok yakın değerler sağlayan kullanışlı testlerdir. Bir diğer yöntem ise Arcan vd. [150] tarafından geliştirilen Arcan testidir.

Zhang ve Sliker [151] *Pinus lambertiana* Dougl., *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl., *Pinus monticola* Dougl., *Pinus strobus* L., *Tilia americana* L., *Eastern cottonwood* Bartr., *Fraxinus americana* L. ve *Liriodendron tulipifera* L. odunlarının kesme modüllerini eksen dışı çekme ve basma testi ile ölçmüştür.

Nadir vd. [152] basma ve Iosipescu kesme testi uygulayarak *Hevea brasiliensis* ağaç malzemenin elastik sabitlerini belirlemeye çalışmıştır. Yer değiştirme verileri, verimsiz hale gelen %10 rutubetli kauçuk ağacının (*Hevea brasiliensis*) 12,7x12,7x25,4mm L, R ve T basma örneklerine yerleştirilen strengeler ile elde edilmiştir. Kesme testinde 20x8x80mm ölçüsündeki örnek ve Iosipescu test düzeneği kullanılmıştır. Ayrıca blok kesme testi ile Iosipescu kesme testi karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda 12 elastik sabit, basma ve Iosipescu testi ile elde edilmiştir.

Melin [153] çalışmasında ortotropik malzemelerin kesme testinde kullanılan Iosipescu fikstürünün iyileştirilmesini sağlamıştır.

Xavier vd. [154] *Pinus Pinaster* Ait. odunu kesme modüllerinin belirlenmesinde Iosipescu ve eksen dışı basma testlerini kullanmış ve her iki testinde farklı sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Eksen dışı basma testinde sadece LR ve LT düzlemlerindeki kesme modülleri belirlenmiştir. Her iki testte de gerilme-şekil değiştirme verileri strengeler ile elde edilmiştir. Ayrıca her iki yöntemi de SEA ile incelemiştir.

Xavier vd. [155] 74 yaşındaki *Pinus Pinaster* Ait. odunu G_{RT} , G_{LT} ve G_{LR} kesme modüllerini Arcan testiyle sırası ile 239, 1090 ve 1330N/mm² olarak belirlemiştir. Gerilme-şekil değiştirme verileri strengçe ile ölçülmüştür.

Müller vd. [156] çalışmasında Elektronik Speckle Pattern Interferometry (ESPI) yöntemi yardımı ile Arcan test düzeneğini kullanarak ağaç malzemede homojen kesme gerilimini ölçmüştür. Kesme testi çekme modunda gerçekleştirilmiştir.

Yoshihara ve Matsumoto [157] düzlem içi kesme testinin Iosipescu kesme testine yakın kesme modülü sonuçları verdiğini belirtmiştir.

Semenov [158] ortotropik malzemelerin kesme modüllerinin torsiyon testi ile belirlenmesini incelemiştir. Wang vd. [159] Moğol Meşesi, Çin Çamı ve Sitka Ladini'nin bazı kesme modüllerini kare plaka torsiyon testi ile belirlemiştir. Janowiak ve Pellerin [160] torsiyonal yükleme ile üç farklı rekonstitüye odunun kesme modüllerini belirlemiştir. Hassan vd. [161] sarıçam odunu kesme modülünü torsiyonel vibrasyon testi ile 570N/mm² olarak belirlemiştir

Yoshihara [162] sitka ladininin kesme modülünü, kare burulma tahtası yöntemi ve asimetrik dört nokta eğilme testleri ile belirlemiş ve sonuçları karşılaştırmıştır.

Karasconyi [163] odunun kesme modülünü çekme testinde vidyo ekstensometre ile elde ettiği gerilme-şekil değiştirme verileri ile belirlemiştir. Wu ve Shao [164] *Cinnamomum camphora* odunu G_{TL} 'sini 3B imaj korelasyon sistemi ile 804N/mm² olarak belirlemiştir. Jeong ve Park [165] bazı ağaç türlerinin kesme modüllerini çekme testinde dijital imaj korelasyonu ile belirlemiştir. En yüksek kesme modülü değeri, *Larix kaempferinin* G_{LT} 'sinde 2680N/mm² olarak belirlenmiştir.

Niemz vd. [166] Avrupa kayınının rutubet bağlı (%30, 65, 85 ve 95 bağıl nem ve 20°C sıcaklık) kesme modüllerini çekme testi ve imaj korelasyonu ile belirlemiştir. Niemz vd. [167] 640-690kg/m³ yoğunluklu Avrupa kayını G_{LR} , G_{LT} ve G_{RT} 'sini çekme testiyle sırasıyla 1240, 940 ve 380N/mm² olarak belirlemiştir. 760kg/m³ ve 720kg/m³ yoğunluklu Avrupa kayını G_{RT} 'si sırasıyla Stamer ve Sieglerschmidt [168] ve Hoefflin ve Aicher [137] tarafından 470N/mm² olarak belirtilmiştir.

Bucci vd. [169] Iroko odunu kesme modülünü üç nokta eğilme testiyle incelemiştir.

Dumond ve Baddour [170] sitka ladini levhalarının G_{LR} 'sini statik iki nokta kare plaka burulma testi ile 777N/mm² belirlemiştir.

Yoshihara ve Yoshinobu [171] farklı yükseklik ve uzunluk oranlarına sahip Douglas Fir'inin G_{LR} 'sini eğilme titreşimi (flexural vibration) testi ile belirlemiş ve bu oranın 0,2'den düşük olması gerektiğini ifade etmiştir.

Roohnia ve Kohantorabi [172] kare ve dikdörtgen kesitli sarıçam odunu kesme modüllerini eğilme ve torsiyonal titreşim testleri ile belirlemiştir.

Dackermann vd. [16] *Eucalyptus maculata* ve *Eucalyptus microcorys* örnekleriyle 4 nokta eğilme, basma, çekme, Poisson oranı ve ultrasonik testler gerçekleştirmiştir. Basma ve çekme testlerinde farklı özelliklerde ekstensometre ve strengeler kullanılmıştır. Ultrasonik testte 25x25x150mm'lik parçalar birleştirilerek 150x150x150mm'lik bir küp oluşturulmuş ve parça birleşim yerlerinde 25 ölçüm noktası belirlenmiştir. Ayrıca 5m'lik direkler ve 30cm çapındaki enine kesit diskler de ultrasonik yöntemle test edilmiştir. Ultrasonik testlerde boyuna dalga için 24kHz, kesme dalgası için de 250kHz frekanslı transdüserler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda iki türün elastik sabitleri, statik ve ultrasonik yöntemlerle belirlenmiş ve literatürle karşılaştırılmıştır. Statik ve ultrasonik yöntemle elde edilen verilerdeki farklılıklar, elastikiyet modülünde %22, rijitlik modülünde %20 ve poisson oranında %37 olarak bulunmuştur. İki türün yüksek yoğunluğu ve özel mikroskobik yapıları nedeniyle radyal ve teğet kesitteki elastikiyet modülünün ultrasonik yöntemle hesaplanması durumunda 0.5'lik bir kalibrasyon katsayısı önerilmiştir.

Aira vd. [173] İspanyol Sarıçamı elastik sabitlerini, 16x16x48mm ölçülerinde 45° eksen dışı basma örnekleri ile belirlemiştir. Yatay ve dikey yöndeki gerilme-şekil değiştirme verileri, strengelerle elde edilmiş ve G_{LR} , G_{LT} ve G_{RT} sırasıyla 1334, 1280 ve 737N/mm² olarak belirlenmiştir.

Moya ve Bano [174] *Pinus elliotti* ve *P. Taeda*'nın elastik sabitlerini basma ve eğilme testleriyle belirlemiştir. Örnekler 20°C ve %65RH'de iklimlendirilmiştir. 10mm'lik strengelerin kullanıldığı basma testiyle elde edilen veriler kullanılarak kesme modülü değerleri, Aira vd. [173]'nin önerdiği ve bu çalışmada da kullanılan eşitlikle hesaplanmıştır. %12 rutubet içeriğinde G_{LR} , G_{LT} ve G_{RT} değerleri sırasıyla 984, 605 ve 523N/mm² olarak belirlenmiştir. USDA [22] *Pinus elliotti* ve *P. Taeda* için bu değerleri sırasıyla 754, 726 ve 137N/mm² ve 1008, 996 ve 160N/mm² olarak belirtmiştir.

Liu [148] ortotropik elastisite teorisine göre *Picea sitchensis* Carr. odununda eksendışı çekme testi gerçekleştirmiştir. Ağaç malzeme kesme direncinin belirlenmesinde 10°'lik

eksen dışı çekme testinin kullanılabilceği ve bu yöntemin ekonomik ve kolay uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

Orlowski vd. [175] %12 rutubetli sarıçam odununun liflere dik ve paralel kesmede akma gerilmelerini, statik eğilme testi ve daire testerede kesim ile belirlemiştir.

Ehrhart vd. [176] Norveç ladini, sarıçam, kayın, kavak ve huş odunlarının Rolling shear modülü ve direncini 14° açılı özel düzenek kullanarak basma testi ile belirlemiştir. Yumuşak ağaçların testinde kayın odunu yükleme plakası kullanılmışken sert ağaçlarda çelik plaka kullanılmıştır. Norveç ladini örneklerinin öze olan radyal uzaklığının Rolling shear modülüne ters etkisi olduğu, Rolling shear modülü ile yoğunluk arasında yüksek ilişki olduğu belirtilmiştir. Ayrıca kesme gerilmesinin uniform dağılım gösterip göstermediğini belirlemek için SEA'de gerçekleştirilmiştir.

Franzoni vd. [177] heterojen çapraz lamine ahşap (Cross Laminated Timber-CLT) panellerin eğilme davranışı esnasındaki kesme etkilerini incelemiş, küçük ölçekli kusursuz Norveç ladini odununa da Rolling shear testi uygulamıştır. Brandner vd. [178] düzlem içi yük altındaki CLT'lerin kesme özelliklerini incelemek için bir test düzeneği ve deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Brandner vd. [179] CLT'ye ait kesme modülü bilgilerini derlemiştir. Ido vd. [180] CLT'nin kesme modülünü Timoshenko-Goens-Hearmon fleksural titreşim yöntemi ile belirlemiştir. Liao vd. [181] okalıptustan imal edilmiş CLT'nin kesme modülünü eğilme testi ile belirlemiştir. Mustamin ve Suryoatmono [182] üç tabakalı kapur odunu CLT kirişlerinin dik ve paralel kesme modüllerini üç nokta eğilme testi ile tahmin etmiştir. Park vd. [183] bazı Kore sert ve yumuşak ağaçları ile oluşturulan çapraz lamine odunların kesme modülünü üç nokta statik eğilme testi ile belirlemiştir. Aicher vd. [184] dış katmanı Avrupa ladini iç katmanı Avrupa kayını olan CLT'nin Rolling shear modülünü hesaplamış ve yumuşak ağaçlardan daha fazla olduğunu belirtmiştir. Aicher vd. [185] kayın odununun Rolling shear modülü ve Rolling shear direncini sırasıyla 370N/mm² ve 4,5 N/mm² hesaplamış ve ikisi arasındaki belirleme katsayısını (R^2) 0,396 olarak belirtmiştir. Baradit vd. [186] düşük G_{RT} değerin Rolling shear'a neden olabileceğini belirtmiştir.

Xu vd. [187] Moğol Sarıçamı'ndan imal tutkallı lamine ahşabın (Glued Laminated Timber - GLT) G_{RT} 'sini basma G_{LR} ve G_{LT} 'sini üç nokta eğilme testi ile belirlemiştir.

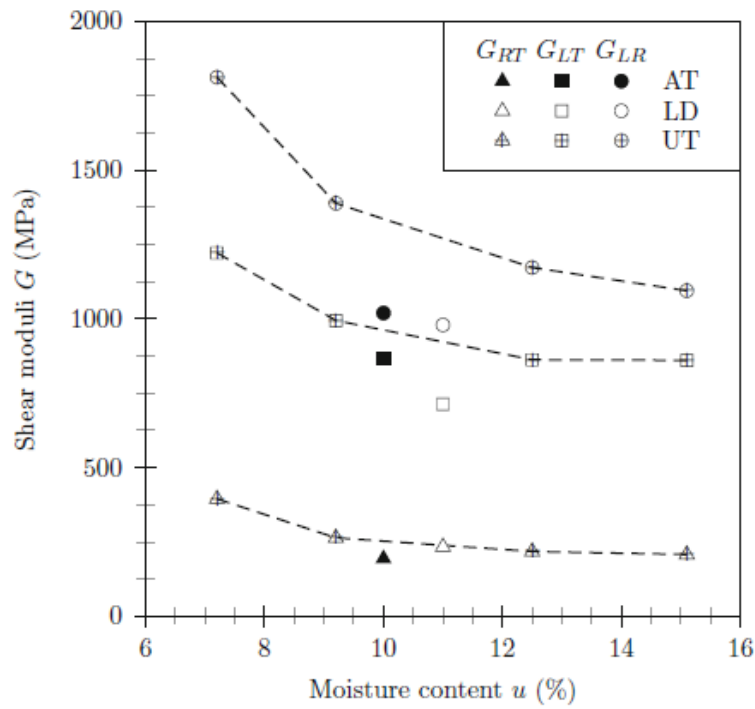
Karagiannis vd. [188] 300x55x32mm ölçülerindeki İskandinav ladini glulamin G_{12} kesme modülünü 192N/mm² olarak belirtmiştir.

Yoshihara vd. [189] MDF'nin G_{LT} 'sini simetrik 4 nokta eğilme testi ile belirlemiştir.

Baradit ve Niemz [190] bazı Şili odun türlerinin kesme modüllerini belirlemiştir.

Okoroafor vd. [191] odun talaşı, kum ve çimento ile oluşturulan kompozit malzemenin kesme modülünü, (2720-4150N/mm²) basma testiyle hesapladığı elastikiyet modulu üzerinden belirlemiştir.

Bachtiar vd. [192] ceviz ve kiraz odunu kesme modüllerini arkan testi ve 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgası kullanarak belirlemiş ve literatür verileri ile karşılaştırmalı olarak rutubete bağlı değişimini Şekil 1.13'deki gibi göstermiştir.

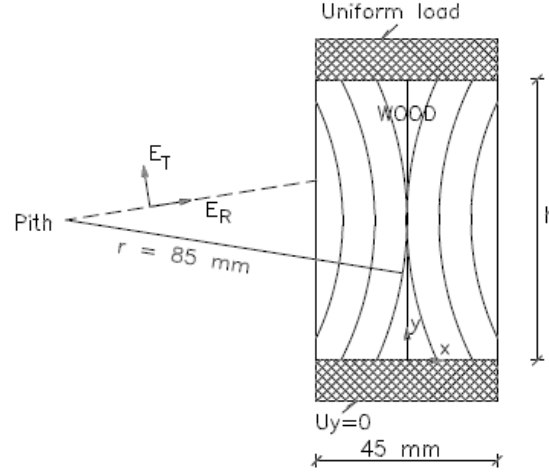


Şekil 1.13. Ceviz odununun rutubete bağlı kesme modülü [192].

Harrison [193] ve Harrison ve Hindman [194] masif ağaç malzeme ve yapısal kompozit kerestelerin kesme modülünü belirlemede kullanılan test yöntemlerini karşılaştırmıştır.

Dündar ve Divos [195] Avrupa'da gerçekleştirilmiş tahribatsız test çalışmalarını derlemiş ve tahribatsız test ve değerlendirmeye dikkat çekmiştir. Dündar vd. [196] meşe ve kestane odunlarının ölçüsel kararlılığını belirlemede ultrasonik ses hızının kullanılabilirliğini değerlendirmiştir.

Clorius [197] 504 kg/m³ yoğunluklu odunlar ile Şekil 1.14'deki gibi oluşturduğu (8 node izoparametrik elementli) SEY ile gerçekleştirdiği analizde kesme modülünün artmasının ER ve ET arasındaki oranın düşmesine neden olduğunu belirtmiştir.



Şekil 1.14. Sekiz nod izoparametrik SE modeli.

Nairn [198] yıllık halka oryantasyonu ve özelliklerinin bir fonksiyonu olarak odunun transvers modülünü SEA ile incelemiş, G_{LR} ve G_{LT} 'nin 2B gerilme-şekil değiştirme analizlerine etkisi olmadığını ve bu nedenle sadece G_{RT} 'nin kullanılabileceğini, yıllık halka kavisi ile düşük G_{RT} değerinin lokal deformasyonlara neden olacağını belirtmiştir.

Xavier vd. [199] 3B eksen dışı basma örneğinin ortotropik katılık özelliklerini belirlemek için SEA gerçekleştirmiştir. 3B sekiz nodlu solid 185 yapısal elementi ile lineer ortotropik elastik davranış sergileyecek homojen SE modellemesi yapılmıştır. Sahil çamı elastik özellikleri, malzeme parametresi olarak girilmiştir. Şekil değiştirme verileri, stereo kamera ile gerçekleştirilen statik testlerle elde edilmiş ve SEA sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Yılmaz Aydın ve Aydın [200] L, R ve T yönlerindeki doğu kayını basma örneklerinin 3B basma davranışını SEA ile incelemiş ve statik test sonuçları ile karşılaştırmıştır. Modellemede Solid 45 3B yapısal element kullanılmış ve model ortotropik özellikler ile doğrusal olmayan analize tabi tutulmuş ve elde edilen yük-deformasyon eğrileri statik eğriler iyi uyumluluk göstermiştir.

İbrahim ve Mahmood [201] fiber reinforced polymer/plastik laminelerle güçlendirilmiş beton kirişlerin SE modellemesini ANSYS yazılımında Solid 45 yapısal element kullanarak gerçekleştirmiştir.

Tankut vd. [202] SEA'nin odun malzeme ve mobilya analizinde kullanımını literatür üzerinden incelemiştir. Gaff vd. [203] %12 rutubet içeriğindeki Avrupa kayını ve titrek kavak odunlarını SolidWorks ile ortotropik olarak modellemiş ve eğilme davranışını

statik test sonuçları ile karşılaştırmıştır. Ayrıca kalınlığın etkisini de belirlemek için 2mm'den 20mm'ye kadar çift sayılı kalınlıkların etkisini incelemiştir. Vratusa vd. [204] kontrplaktan yapılmış dört farklı sandalye oturaklarının yük-deformasyon davranışını incelemek için SolidWorks ile SEA gerçekleştirmiş ve statik test sonuçları ile karşılaştırmıştır. Yılmaz [205] kayın odunundan imal edilmiş alternatif ara kayıtlı sandalye çerçevelerinin diyagonal yüklemesini statik testlerle incelemiş ve SolidWorks ile SE modellemesini gerçekleştirmiştir. Bu sayede en düşük enine kesit ve en uygun ara kayıt konumu, deneysel ve sayısal yöntemle belirlenmiştir. Yıldırım vd. [206] sarıçam odunundan zıvanalı birleştirme yöntemi ile üretilmiş koltuk çerçevelerinin sonlu elemanlar analizini ANSYS yazılımı ile gerçekleştirmiş ve sonuçların statik test ile %81,25 uyduğunu belirtmiştir. SEA'nde MoE, MoR, çekme ve akma gerilme verileri kullanılmıştır. Aydın ve Yılmaz Aydın [207] 3B ortotropik kayın malzeme özellikleri kullanarak ön-arka ayak enine kesit ölçüleri farklı ve zıvanalı birleştirme şeklinde modellenen sandalye çerçevelerinin SEA'ni CATIA V5 ile gerçekleştirmiştir. Kasal vd. [208] doğu kayını farklı zıvana genişliği ve boyu ile üretilen T tipi mobilya birleştirmelerinin mekanik davranışını deneysel ve SEA ile incelemiştir. SEA'nde ANSYS yazılımı kullanılmış olup rijitlik ve yer değiştirme verilerini sırası ile en fazla %31,6 ve %20,76 fark ile belirlemiştir. Karaman [209] MDF ve parçacık tabladan imal demonte kitaplığın rijitliğini ANSYS yazılımı ile analiz etmiş ve statik test sonuçları ile karşılaştırmıştır. Birleştirme elemanları metal ve plastik olarak modellenmiştir. Doğrusal analiz sonuçlarının statik test sonuçları ile çok yakın olduğu belirtilmiştir. Güntekin [210] kavelalı mobilya köşe birleştirmelerinin SEA'ni gerçekleştirmiştir. Beam3+combin39 ve shell63+combin39 ile modellenmiş birleştirmeler ANSYS yazılımı ile analiz edilmiştir. Homojen olmayan ahşap yapısının ve doğrusal davranış göstermeyen birleştirmelerin modellemede dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Marmier vd. [211] odun mikro yapısının çok fazla anizotropik olduğunu ve sıra dışı elastik özellikler sergileyebileceğini belirtmiştir. Bunlardan birinin de negatif Poisson oranı olduğunu ifade ederek bunu tasdik edebilmek üzere eksen dışı basma testi ve SEA gerçekleştirmiştir. Eksen dışı basma testinde Pinus strobus ağacı ve strengaç kullanılmıştır. Çalışma sonucunda bazı yönlerde negatif Poisson oranlarının her iki yöntemde de elde edildiği belirtilmiştir.

Hwang ve Suzuki [212] Japon davul ağacı fiçilerinin titreşimi esnasında oluşturduğu rezonans frekanslarının SEA'ni gerçekleştirmiştir. Bu sayede uygulamalı olarak

ölçülemeyecek verilerin elde edilmesini sağlayabilecek modelin kullanılabilirliğini belirtmiştir.

Hunt ve Gu [213] odunun R ve T yönlerindeki ısı transferini ANSYS ile modellemiştir. Vaziri vd. [214] 25x500x48mm ölçülerindeki iki simetrik sarıçam odunu parçasında sürtünme esnasında meydana gelen üç boyutlu ısı akışını SEA ile incelemiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır.

Sretenovic vd. [215] masif ağaç malzemenin L yönündeki kesme direnci ve kesme modülü tespiti için yeni bir kesme testi düzeneği geliştirmiştir. Melez (çam) ve ladin odunlarına blok kesme ve yeni geliştirdiği düzenek ile mekanik testler uygulamıştır. İki türün dokuz elastik sabitini kullanarak SEA gerçekleştirmiş ve geliştirdiği düzeneğin kesme direnci ve kesme modülünün doğrudan tahmin edilebilmesinde iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Cavalli vd. [216] yapısal ahşabın kesme modülünü SEA ile modellemiştir. Modellemede kullandığı kesme modülü verilerini torsiyon testi ile elde etmiştir. Karakoç ve Freund [217] Norveç ladininin mikro-mekanik davranışını modelleme ile incelemiş ve hücre sayısının azalmasının kesme modülünü olumsuz etkilediğini belirtmiştir. Zhang ve Yang [218] kusursuz odunun kesme özelliklerini ölçmek için Iosipescu kesme test yöntemini modifiye etmiş ve bunu SEY ile incelemiştir. Elde ettiği sonuçları basma ve eksen dışı çekme testleri ile elde edilen verilerle karşılaştırmıştır. Pencik [219] sarıçam odununun ortotropik ya da anizotropik plastisiteye göre modellenmesindeki G_{RT} , G_{LT} ve G_{LR} değerlerini, sırasıyla 500, 800 ve 1230N/mm² olarak belirtmiştir. Yoshihara vd. [220] eğilme testi ile altı farklı türün 20°C ve %65RH'deki G_{LT} 'sini belirlemiş ve SEY ile analizini gerçekleştirmiştir. Olsson ve Kallsner [221] kusursuz odunun kesme modülünü belirlemek için SEM önermiştir. Kouroussis vd. [222] çalışmasında odunun mekanik özelliklerini değerlendirmek için modal analiz gerçekleştirerek odunun elastik sabitlerini incelemiştir. Araştırmacılar modellemede oluşturulan delik ve çatlak gibi sanal kusurların doğal frekans üzerine kayda değer bir etkisi olmadığını belirtmiştir. Andrews [223] SEY ile ultrasonik transdüserleri ve ultrasonik dalga yayılımını modellemiştir.

Hearmon [224] ağaç malzemenin elastik karakterizasyonu için ultrasonik dalga tekniğini teşvik eden ilk araştırmacılardandır. Zimmer ve Cost [225] boyuna (longitudinal) ve enine (transverse) ultrasonik dalga yayılımı ile elastik sabitleri ilk belirleyenlerdendir. Preziosa vd. [226] ve Preziosa [227] ağaç malzemenin katılık matrisinin belirlenmesinde ultrasonik yöntemin kullanılmasına öncülük yapmıştır.

Beall vd. [228] odun ve odun ürünlerin ultrasonik tahribatsız muayenesinin geçmişi, günümüzü ve geleceğini değerlendirmiştir.

Halabe vd. [229] ultrasonik yöntem kullanılarak yapısal özelliklerin ve kusurların tahmininde kayda değer başarılar elde edildiğini belirtmiştir.

Campbell [230] ultrasonik muayenenin, yüksek frekanslı enerjinin malzemede iletilmesi ile yüzey ve iç kusurların tespiti, kalınlık ölçümü ve kusur yerinin tespiti gibi saptamaların yapılmasında kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemi olduğunu belirtmiştir.

Senalik vd. [231] kesme dalgasının dalga cephesine paralel ve dalga yayılım yönüne normal parçacık hareketi yaptığını belirtmiştir.

Wang vd. [232] ultrasonik dalga yayılımının, dikili ağaç, tomruk, odun ve odun temelli malzemelerin direnç özelliklerini tahmin etmede en kullanışlı tahribatsız yöntemlerden biri olduğunu belirtmiştir.

De Andrade Maia vd. [233] 50kHz frekanslı ultrasonik boyuna ve kesme dalgası ile yaklaşık 20cm çaplı eşek arısı kusuru olan ve olmayan çam tomruklarını incelemiştir.

Miettinen vd. [234] çam türlerinde ultrasonik ölçümler gerçekleştirmiştir. Ölçümler, MC, yoğunluk, yıllık halka açısı, sertlik ve direnç ile ilişkilendirilmiştir.

Conde vd. [235] tarihi bir yapının korunma durumunu ultrasonik olarak değerlendirmiştir.

Song vd. [236] yıkılmış ahşap yapılardan elde ettiği odunların ultrasonik ses hızı ve sinyal zayıflamasını belirlemiştir.

Vorobyev vd. [237] 1628 yılında meşeden yapılmış Vasa gemisinden 25x25x25mm kübik örnekler alıp tüm yönlerdeki elastik sabitlerini tek küp aparatı (single cube apparatus) ve ultrasonik yöntemle belirlemiştir.

Bucur ve Archer [238] altı farklı türün elastik özelliklerini ultrasonik yöntemle belirlemiş ve katılık matrisinin tüm diyagonal terimlerdeki doğruluk oranının %3-4 farklılık gösterdiğini, eksen dışı terimlerde ise bu oranın %4-20 arasında olduğunu belirtmiştir.

Daud vd. [239] bazı Malezya sert ağaçlarının elastik sabitlerini sıvıya daldırma yöntemi ile ultrasonik (2,25MHz) olarak belirlemiştir.

Kohlhauser ve Hellmich [240] yaklaşık %67'lik poroz yapıya sahip ve %12 rutubetli ladin odununun ortotropik Poisson oranlarını statik ve ultrasonik (50, 100, 250 ve 500kHz) testlerle belirlemiştir.

Goncalves vd. [241], [242], Ozyhar vd. [243], Longo vd. [244], El Mouridi vd. [245], Dahmen vd. [111] ve Vazquez vd. [143] dinamik testlerle elde edilen kesme modülü değerlerinin statik testlerle elde edilen değerlerle iyi uyuştuğunu belirtmiştir.

Francois [246] 26 yüze sahip bir polihedral örneğin ağaç malzeme elastik sabitlerinin belirlenmesinde kullanılmasını önermiştir. Goncalves vd. [241] ve Vazquez vd. [247] 26 yüzeyli polihedron örnekler üzerinden odunun elastik özelliklerini tahmin etmiştir.

Goncalves vd. [242] ultrasonik ve statik yöntemlerle %12 rutubet değerli *Eucalyptus saligna*, *Apuleia leicarpa* ve *Goupia glabra* odunları elastik özelliklerini belirlemeye çalışmıştır. Çalışmada Epoch 4 cihazı ve 1MHz frekanslı transdüser kullanılmıştır. Gürültü azaltımı ve hassas ölçüm için enine dalgalarda SWC (Shear Wave Couplant) temas maddesi kullanılırken boyuna dalgalarda glikoz nişastası kullanılmıştır. Çalışmada 135mm çaplı ve 15° kenarlara sahip disk, 26 yüzeyli polihedron ve prizma kesitli örneklerin rijitlik matriksinin diyagonal özelliğini belirlemede herhangi bir olumlu ya da olumsuz katkısı olmadığını belirtmiştir. Poisson oranı değerlerinde ise tür ve geometriye bağlı olarak farklı sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Bu durum temel aksların orthogonal konumlanmasına ve yıllık halkaların açı-eğimine bağlanmıştır.

Kahle ve Woodhouse [248] hücre geometrisinin yumuşak ağaçların elastikiyetine etkisini incelemiş ve Norveç ladinini kesme modüllerini tahmin etmiştir.

Kranitz vd. [249] Norveç ladinini, Avrupa meşesi ve sarıçamı eski (kullanım ömrü bitmiş olan) odunlarının kesme modüllerini 1MHz kesme frekansı kullanarak belirlemiş ve yeni odun verileri ile karşılaştırmıştır.

Kranitz [250] doğal yaşlandırmanın odundaki etkilerini incelemiş ve ladin, göknar ve meşe odunlarının kesme modüllerini ultrasonik yöntemle belirlemiştir.

Kranitz vd. [251] kullanılmış Norveç ladinini (*P. abies* L. Karst.) odunu elastikiyet ve kesme modülünü ultrasonik yöntemle belirlemiştir.

Baradit vd. [186] 1MHz kesme dalgası yayılım hızı ile altı farklı türün kesme modüllerini belirlemiştir.

Davies vd. [252] *Pinus radiata* kesme modüllerini akustik hız ölçümü ile belirlemiştir.

Akar [253] Akdeniz bölgesinden temin edildiği belirtilen sarıçam odununun rutubete bağlı on iki elastik sabitini ultrasonik ve statik yöntemlerle belirlemiştir. Ultrasonik ölçümler ve basma testleri sırasıyla 20x20x20mm ve 20x20x60mm örneklerle gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda rutubetin kesme modülleri üzerine negatif ve zayıf bir etkisi olduğu belirtilmiştir.

Iñiguez vd. [254] sarıçam odununda örnek uzunluğun ultrasonik dalgada meydana getirdiği değişimleri incelemiştir. Iñiguez vd. [255] sarıçam odunun bazı mekanik özelliklerini ultrasonik dalga hızı ile tahmin etmiştir.

Güntekin ve Yılmaz Aydın [256] kızılçam, karaçam, sedir ve doğu kayını eğilme özelliklerini ultrasonik dalga yayılımı ile tahmin etmiştir.

Hermoso vd. [257] sarıçam panelleri bütünlük görsel ve ultrasonik sınıflandırma yöntemi ile değerlendirmiştir.

Tallavo vd. [258], [259] ultrasonik ölçümler ile iletim hatlarında kullanılan odun direklerin karakterizasyonunu gerçekleştirmiştir.

Baar vd. [260] beş tropik türün ses iletim hızlarını boyuna (L) dalga kullanarak belirlemiştir.

Büyüksarı ve As [261] farklı çaplarda bükülmüş meşe ve kayın odunlarının ultrasonik ses hızlarını belirlemiştir.

Puccini vd. [262] kusurlu odunlardaki ultrasonik dalga hızı değişimini belirlemiştir.

Calegari vd. [263] ultrasonik dalga hızının örnek en-boy oranının artması ile düştüğünü belirtmiştir.

Llana vd. [264] İspanya'da yetişen *Pinus radiata* D.Don., *Pinus sylvestris* L., *Pinus nigra* Arn.) ve *Pinus pinaster* Ait. odunlarının akustik dalga hızlarını üç farklı tahribatsız muayene test cihazı kullanarak belirlemiştir.

Karlinasari vd. [265] bazı Hint sartağaçlarının akustik özelliklerini belirlemek için ultrasonik dalga yayılım yöntemini kullanmıştır.

Arciniegas vd. [266] dikili ağaçların akustik ve ultrasonik tomografisi üzerine yapılan çalışmaları derlemiştir.

Auty [267] sarıçam odunun MoE ve MoR'ını akustik ses hızı ile belirlemiştir.

Lindström vd. [268] sarıçam dikili ağaç ve tomruklarının elastikiyet modülünü

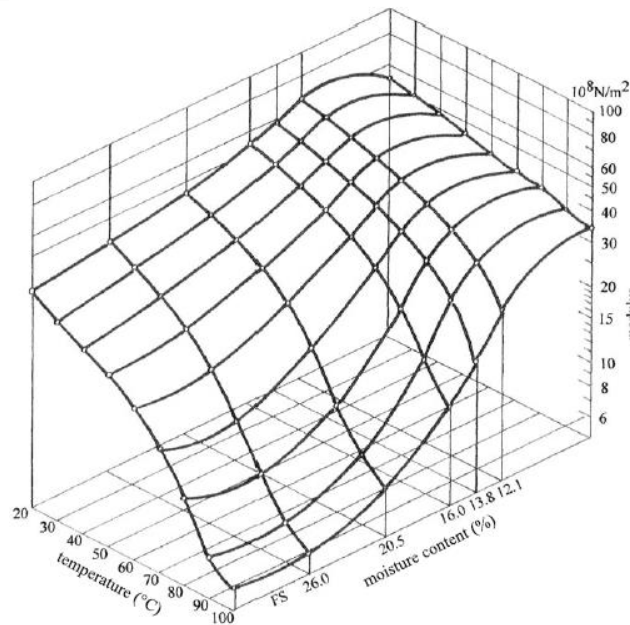
ultrasonik dalga yayılımı ile belirlemiştir. Dzbenski ve Wiktorski [269] dikili ağaç ve tomrukların mekanik özelliklerini ultrasonik ölçümlerle değerlendirmiştir. Karlinasari vd. [270] dikili Agar ağacında ultrasonik ses hızının sonik ses hızından %29,5 daha hızlı olduğunu belirtmiştir.

Karlinasari vd. [271] Agar ağacı odununun rutubet içeriğinin ses dalgası hızına etkisini incelemiştir.

Sanabria vd. [272] ağaç ve tutkalların ultrasonik malzeme özelliklerinin birbirine çok yakın olduğunu belirtmiştir.

Leighton [273]'a göre sesin havada yayılım hızı (343m/sn) suda yayılım hızından (1497m/sn) daha yavaştır. Katılarda ise malzeme türü ve yapısına bağlı olarak çok farklı hızlar mevcuttur. Niemz ve Mannes [274]'e göre ses dalgası yayılım hızı, malzemenin elastik özelliklerine bağlıdır. Ayrıca dalganın yayılım hızına ve dolayısı ile ölçülen özelliklere etki eden sıcaklık, rutubet içeriği, yoğunluk, strüktür gibi faktörler de mevcuttur ve Ayan [107] ortam sıcaklığının, ses yayılım hızını etkilediğini belirtmiştir.

Sıcaklık ve rutubet içeriğinin kesme modülüne etkisi, Becker ve Noak [275] ve Bucur [105] tarafından kayın ağacı test edilerek Şekil 1.15'deki gibi belirtilmiştir.



Şekil 1.15. Sıcaklık ve rutubetin kayın odunu kesme modülüne etkisi.

Ridley-Ellis vd. [276] %8 rutubetli sarıçam odunu kesme modülünün 110, 120 ve 140°C sıcaklıkta sırası ile 170, 130 ve 205 gün ısıl işlem sonucu değişimini incelemiş ve akustik yöntemlerle değerlendirmiştir.

DeVallance [277] odunun tahribatsız muayenesinde rutubet içeriğinin ve sıcaklığın stress dalga hızını etkilediğini belirtmiştir.

Calegari vd. [263] rutubet içeriğinin ultrasonik dalga hızını etkileyen ana etken olduğunu ve ikinci etkeninde yoğunluk olduğunu belirtmiştir. Yang vd. [278] rutubet içeriğinin artışı ile ses hızının düştüğünü belirtmiştir. Dündar vd. [196] ultrasonik ses hızının rutubet içeriği artışı ile düştüğünü belirtmiştir. Van Dyk ve Rice [279] ultrasonik dalga hızı ile rutubet içeriği arasında güçlü bir ters ilişki olduğunu belirtmiştir.

Llana vd. [280], [281] sıcaklık ve MC'nin sarıçam odunu ultrasonik ses hızı üzerindeki etkileşimli etkileri incelemiş ve %10-18 arasındaki rutubet içeriği etkisinin doğrusala yakın olduğunu belirtmiştir.

Gao vd. [282] sıcaklık ve rutubet içeriğinin kızılçam odunu ultrasonik ses hızı üzerindeki etkileşimli etkileri belirlemiştir. Rutubet içeriğinin ses hızı ve sıcaklık arasındaki ilişkiye kayda değer etki yaptığını ortaya koymuştur.

Zhu vd. [283] yüksek sıcaklıkla modifikasyonun, Picea jezoensis odunu akustik-vibrasyon performansına etkisini belirlemiştir.

Quarle [284] rutubet içeriğinin sinyal zayıflamasına etkisini incelemiş ve sinyal zayıflamasının rutubet içeriğinin %18 altında olması durumunda sabit olduğunu fakat bu değer üzerinde çıktığında arttığını belirtmiştir.

Oliveira vd. [285] rutubet içeriğinin artması ile ultrasonik ses hızının düştüğünü ve sinyal zayıflamasının arttığını belirtmiştir.

Halabe vd. [286]'ne göre sadece ses hızı ölçümü ile elde edilen verilerin, ultrasonik ses dalgasındaki sinyal zayıflaması nedeniyle anlamını yitirme olasılığı vardır.

Yang vd. [278] rutubet içeriğinin ultrasonik akustik özelliklere etkisini incelemiş ve ses hızının rutubet içeriği artışı ile düştüğünü belirtmiştir. Ayrıca, R yönündeki rutubet içeriğinin T yönündekinden fazla olması durumunda hızın düştüğü belirtilmiştir.

Yang vd. [278] ultrasonik ses hızının, rutubet içeriğinin %32'ye kadar artışıyla düştüğünü fakat bu noktadan sonraki artışlarda sabit kaldığını ve ultrasonik sinyal enerjisinin rutubete bağlı olarak düştüğünü belirtmiştir.

Sakai vd. [287] birçok türle 1MHz frekans ile gerçekleştirdiği ultrasonik ölçümler sonucu rutubet içeriğinin artışı ile ses hızının azaldığını ve sinyal zayıflamasının arttığını belirtmiştir.

Oliveira vd. [288] *Goupia glabra* odunun ultrasonik ses hızını, odun taze hal rutubet içeriğinden %6 rutubet içeriğine ulaşıncaya kadar ölçümlemiş ve kuru haldeki hızların daha yüksek olduğunu belirtmiştir.

Montero vd. [289] sarıçam odunu rutubet içeriğinin (%9'dan 35,5'e kadar) dalga hızına etkisini araştırmıştır. Rutubetin hıza ters etki ettiği belirtilmiştir.

Ross ve Pellerin [290], Simpson ve Wang [291], Kang ve Booker [292] odunun rutubet içeriğinin azalması ile ses dalgası hızında kayda değer artış olduğunu belirtmiştir.

Wang vd. [232] rutubet içeriğindeki azalmanın L ve R yönlerindeki ultrasonik dalga hızlarını yükselttiğini belirtmiştir.

Saadat-Nia vd. [293] 300kHz'de boyuna ve enine dalgalar ile kavak ve ladin ağacının normal ve reaksiyon odunlarında ultrasonik dalga parametrelerini incelemiştir. Ayrıca rutubet içeriği artışı ile ses hızının düştüğünü belirtmiştir.

Kabir vd. [294] rutubet içeriği ile ultrasonik dalga hızı arasında yüksek bir (ters) ilişki olduğunu ve (kauçuk ağacı) liflerin ultrasonik dalga yayılım yönü ile yaptığı açının L'den R'ye ve L'den T'ye dönmesi ile hızın ciddi şekilde düştüğünü fakat T'den R'ye dönmesi durumunda arttığını belirtmiştir.

Si vd. [295] rutubet içeriğinin ultrasonik ölçümler üzerine önemli etkisi olduğunu belirtmiştir.

Gonçalves vd. [296] Brezilya'da plantasyon ile yetiştirilmiş *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus grandis* ve *Eucalyptus pellita* yapısal kerestelerinde referans ultrasonik dalga hızı elde etmek için rutubete bağlı düzeltme faktörü (k_H) belirlemiştir. Düzeltme faktörü MC_{12} ve MC_{LDN} 'ye göre belirlenmiştir. LDN altındaki rutubetlerde k_H değerleri %0.66 ile %0.83 arasında hesaplanmış ve bunların yumuşak ağaçlar için verilmiş olan literatürle de uyumlu olduğu belirtilmiştir. Fakat LDN üstündeki rutubetlerde bu değerlerin yoğunluk artışıyla birlikte %10-30 arasında arttığı belirtilmiştir. Elde edilen düzeltme faktörlerinin ultrasonik dalga yayılımı ile gerçekleştirilen tahribatsız kereste sınıflandırmasında standardizasyon amaçlı kullanılabilir olacağı belirtilmiştir.

Arciniegas vd. [266] ölçülen ses hızında meydana gelen azalmanın, iç kusurlar ya da düzensizlikler nedeni ile sinyalin izlediği yolun uzamasından kaynaklanabileceğini belirtmiştir.

Secco vd. [297] odun içerisinde bulunan oyukların yayılım yapan ultrasonik dalganın

yolunda değişimlere neden olduğunu ve bunun da ultrasonik ses dalgası yayılım hızını düşürdüğünü belirtmiştir.

Wang ve Wang [298] Kore çam türlerinin ultrasonik ses hızına delik ya da boşluğun etkisini incelemiş ve ters ilişki olduğunu belirtmiştir.

Molyneux ve Schmitt [299] ultrasonik dalğanın sinyal zayıflaması ve saçılımının, yayılım yapan dalğanın formunu değiştirdiğini ve bunun hız tahmininde hatalara neden olabileceğini belirtmiştir.

Kohlhauser ve Hellmich [240] ultrases ölçümlerindeki örnek kalınlığı, yıllık halka ve yöneliminin dalga yayılımı üzerindeki etkisini arttırması nedeni ile enerji akışının sapmasını detaylı bir şekilde açıklamıştır.

Kollmann ve Cote [38]'ye göre yoğunluk ile kesme modülü arasındaki ilişki türden türe farklı olabilmektedir zira bu ilişkinin ladinde çok belirgin olmadığı fakat meşede yoğunluğun artışı ile kesme modülünün arttığı belirtilmiştir.

Oberhofnerova vd. [300] doğal yaşlandırılmış odunun elastikiyet modülünü ultrasonik ve statik yöntemle belirlemiş ve yoğunluğun akustik dalga hızına etkisini doğrulamamıştır.

Lin ve Wu [301]'ya göre odunun yoğunluğu arttığında dalga iletim süresi azalırken ses hızı artar.

Oliveira ve Sales [302] yoğunluk artışı ile ses hızının arttığını belirtmiştir.

Tomppo [303] katı bir cisimdeki ultrases hızının öncelikle yoğunluk ve elastikiyetten etkilendiğini belirtmiştir.

Metwally vd. [304] Tatajuba ve İroko odunlarının ultrasonik ses hızı ve kütle hacmini belirlemiştir.

Baar vd. [260]'ne göre yoğunluk ve akustik ses hızı birbirinden bağımsız değildir.

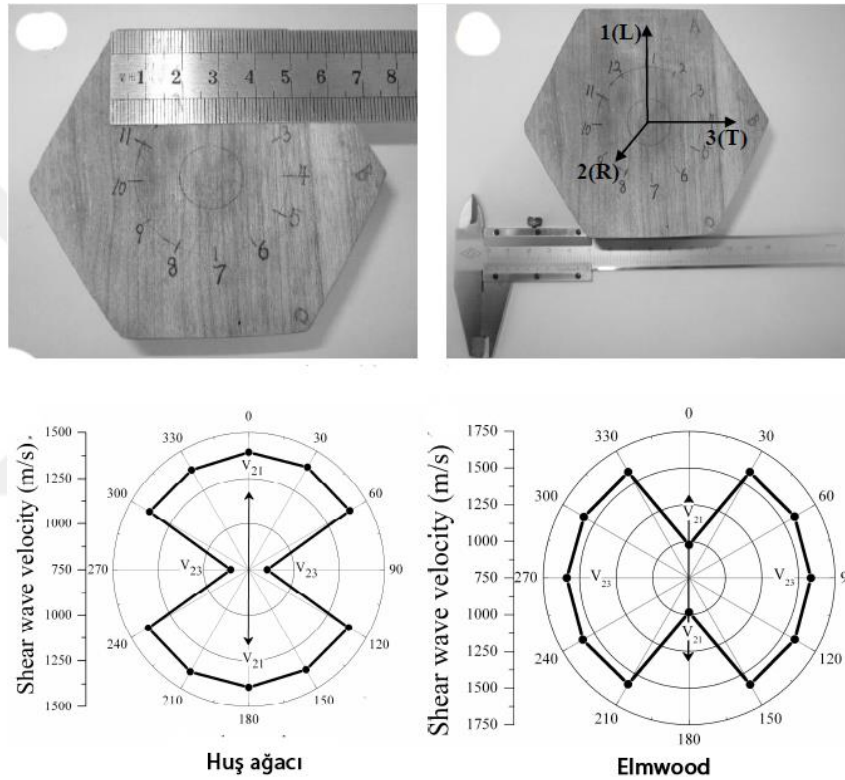
Chauhan ve Walker [305] yoğunluk artışı ile S2 tabakası oranının da arttığını belirtmiştir ve bu durum Baar vd. [260]'ne göre akustik dalga yayılımında önemlidir.

Ayan [107] ses dalgalarının odun içerisindeki yayılışında gördüğü ve liflere dik yönde daha fazla olan direncin büyük oranda yoğunluğa bağlı olduğunu belirtmiştir.

Gerhards [35] %9-15 nem içerikli küçük kusursuz örneklerde gerçekleştirdiği test sonucuna göre L yönündeki hızın 3050-6100m/sn ile en hızlı dalga olduğunu

belirtmiştir. Dackermann vd. [306] ise R yönündeki dalganın T yönündeki dalgadan biraz fazla hızlı olduğunu ve bu yönlerdeki hızların genellikle L yönündeki dalga hızının 1/3'ü kadar olduğunu belirtmiştir. Dackermann vd. [16] ses hızındaki düşmenin yıllık halkaların bir bariyer gibi davranması sonucu meydana geldiğini belirtmiştir.

Zhou vd. [307] odunun anizotropik yapısının kesme dalgası hızına etkisini, huş ve karaağaç odunu V_{RL} ve V_{RT} doğrultusundaki kesme dalgası hızlarını belirleyerek gerçekleştirmiştir. Kesme dalgası hızındaki değişimler, yüzeye konumlandırılan transdüserin açısı döndürülerek Şekil 1.16'de görüldüğü gibi belirlenmiştir.



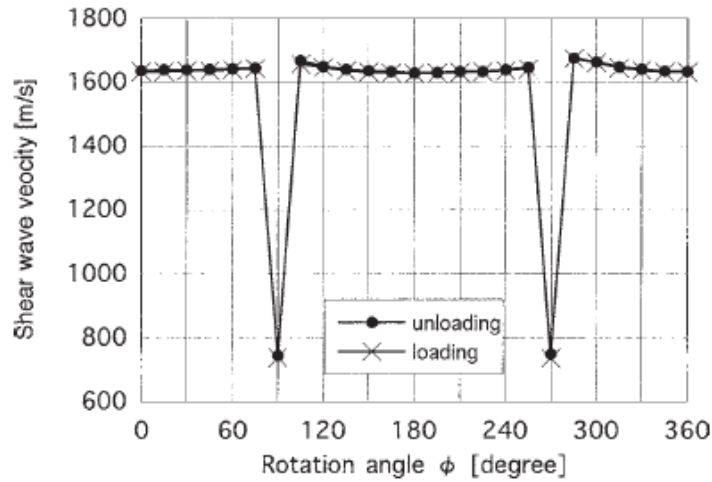
Şekil 1.16. Anizotropinin kesme dalgası hızı üzerine etkisi.

Çalışma sonucunda osilasyon açısındaki değişimin kesme dalgası hızını keskin bir şekilde düşürdüğü belirlenmiştir. Fakat şekilden de anlaşılacağı üzere açı değişikliği bir türün V_{RL} 'si üzerinde diğer türün de V_{RT} 'si üzerinde etkili olmuştur. Huş ağacında 90° ve 270° açı ile hız yaklaşık %45 düşerken karaağaçta hızlar en düşük 0° ve 180° açıdadır ve en yüksek (90° ve 270°) ile aradaki fark %52 civarındadır.

Sasaki ve Hasegawa [308] ikişer farklı yumuşak ve sert ağaç odunlarının tekrarlı yükleme davranışının ultrasonik dalga yayılım hızına etkisini incelemiştir. Buna göre odunun mikroskobik yapısını bozmayacak 0-10MPa arasındaki elastik yük 10 tekrar ile

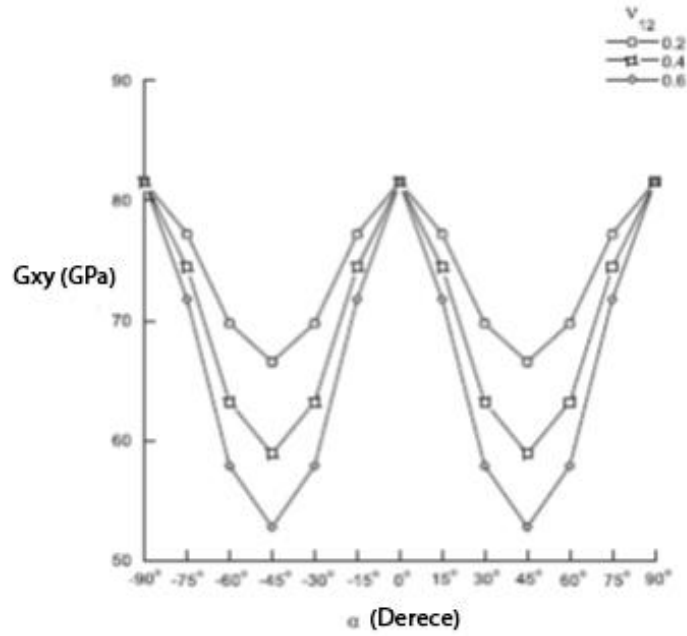
malzemeye döngüsel olarak uygulanmıştır. 500kHz frekanslı transdüser ile ultrasonik dalga hızları ölçülmüştür. Çalışma sonucunda gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve ses hızı-gerilme ilişkisi neredeyse doğrusal ilişkili olarak bulunmuştur. Her ne kadar yazarlar hafif elastik yükün mikroskobik yapıyı bozmadığını belirtse de Borgin vd. [309], Nilsson ve Daniel [310], Erhardt vd. [311]'ne göre normal koşullar altında kullanılan odunda hafif mikroskobik değişimler meydana gelir fakat bunlar mekanik direnç özelliklerinde ayrılmalara neden olacak düşüslere neden olmaz.

Hasegawa ve Sasaki [312] %6,92 rutubetli ve $0,51\text{g/cm}^3$ yoğunluklu hava kurusu Japon magnolya diri odununda eğilme testi esnasında oluşan gerilmelerin ultrasonik kesme dalgasının (0,5MHz frekanslı) hızına ve yayılımına nasıl etki ettiğini belirlemiştir. Eğilme örneği üzerindeki sensörün açılmal olarak değişimi ile kesme hızında meydana gelen değişimler ve bunların yüklenmiş ve yüklenmemiş test durumundaki ilişkisi Şekil 1.17'de görölmektedir.



Şekil 1.17. Kesme dalgası hızı ile sensör açısı değişimi arasındaki ilişki.

Anizotropik malzemede gerilim dağılımının bilinmesi yapısal malzemelerin uygun kullanımı açısından çok önemlidir [313]. Kompozit lamina'nın kesme modülü, malzemenin analizi, uygulaması ve testi için önemi fiziksel parametredir ve anizotropik lamina malzemede kesme modülü -90° , 0° ve 90° 'de en yüksek iken ve bu değerler Şekil 1.18'de görüldüğü gibi lif açısındaki -45° ve $+45^\circ$ 'ye doğru olan değişimlerle birlikte ciddi oranda düşmektedir [314].



Şekil 1.18. Lamina kesme modülünün açığa bağlı değişimi.

Gonçalves vd. [315] 8, 9, 13, 15, 22 ve 23 yaşlarındaki *Pinus elliottii* odununu ultrasonik (45kHz frekanslı L dalgası) ve eğilme testi ile incelemiş ve (15 yaş altı ve üstü olarak anlamlılık kazanan) ağaç yaşının, dalga yayılım hızı, katılık sabiti ve elastikiyet modülüne etki ettiğini belirtmiştir.

Schubert vd. [316] beyaz çürüklük mantarı arız olmuş Norveç ladininin kesme modülünde meydana gelen değişimi belirlemek için modal analiz ve ultrasonik muayene gerçekleştirmiştir.

McCarthy vd. [317] sarıçam odunu kesme modülünün mantar oranı artışı ile birlikte düştüğünü belirtmiştir. Çalışma -100 ile 250°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda kesme modülü eğrisinin formunda anlamlı bir değişim olmadığı belirtilmiştir.

Titta [318] çürüklüğün artışıyla ultrasonik dalga hızının azaldığını, sinyal zayıflamasının arttığını fakat bu değişimlerin mantar ve odun türüne bağlı olarak değiştiğini belirtmiştir.

Ultrasonik yöntem ile ölçülen elastik parametrelerin mekanik testler ile elde edilenlerden daha yüksek olacağı bilinmektedir [105]. Divos ve Tanaka [319] ve Keunecke vd. [320] elastikiyet modülünde bu farkın %10-40 arasında olabileceğini belirtmiştir. Dackermann vd. [16] ultrasonik stres dalgalarına dayalı dinamik test ve geleneksel statik test yöntemi kullanılarak *Eucalyptus Maculate* ve *Microcorys*

türlerinin tüm ortotropik özelliklerinin belirlenmesinde karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmiş, kesme modülünün belirlenmesinde alternatif ultrasonik test yaklaşımının statik test ile ortalama %20 farkla kıyaslanabileceğini belirtmiş ve ağaçların G_{LR} , G_{LT} ve G_{RT} değerleri arasındaki oranı ise sırası ile 2.1/1.8/1 ve 1.9/1.5/1 olarak hesaplamıştır. Fakat USDA [22] *Fraxinus americana*, *Tilia americana*, *Betula alleghaniensis*, *Prunus serotina*, *Populus deltoides*, *Acer saccharum*, *Acer rubrum*, *Liquidambar styraciflua*, *Juglans nigra* ve *Liriodendron tulipifera* odunlarından elde edilen ortalama kesme modüllerine göre bu oranı, 4.6/3.3/1 olarak belirtmiştir. Scheer [321] sert ağaçlar için bu oranı 3.25/2.5/1 olarak belirtmişken, Bodig ve Jayne [9] hem sert hem de yumuşak ağaçlar için bu oranı 10/9,4/1 olarak belirtmiştir.

Ultrasonik dalga yayılım yöntemi, dikili ağaçlarda kusur tespitinde Najafi vd. [322] tarafından başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Feng ve Li [323]'ye göre stres dalga yöntemi ile odunun tahribatsız değerlendirmesinde stress dalgasının yayılım karakteri, tahribatsız muayenenin etkinliği ve doğruluğu üzerinde önemli bir rol oynar. Stres-dalga yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar Ross ve Pellerin [290] tarafından özetlenmiştir. Bu çalışmaya göre küçük ve kusursuz örneklerde statik ve dinamik elastikiyet modülü arasındaki korelasyon katsayısı 0.87 ile 0.99 arasında değişmektedir. Statik ile dinamik elastikiyet modülü arasındaki korelasyon katsayısının küçük örneklerde yüksek olduğu Divos ve Tanaka [319] tarafından da onaylanmıştır. Tomruklarda stres-dalga esaslı elastikiyet modülü ile bu tomruklardan kesilen kerestelerdeki statik elastikiyet modülü arasındaki ilişki stres dalga yöntemi kullanılarak araştırılmış ve korelasyon katsayısının 0.44 ile 0.89 arasında değiştiği bulunmuştur [324]. Wang vd. [325] tarafından yapılan çalışmada stres-dalga hızı ve dikili ağaçlardaki dinamik elastikiyet modülü ile küçük örneklerin mekanik özellikleri arasındaki korelasyon katsayısının 0.63 ile 0.91 arasında olabileceği görülmüştür. Stres-dalga esaslı yöntemler ayrıca LVL (Laminated Veneer Lumber), tabakalı kereste, yonga levha gibi ahşap esaslı kompozit malzemelerin elastikiyet özelliklerinin bulunmasında kullanılmış ve yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir [122]. Li vd. [326] sekiz farklı türde dikili ağaçların LR düzleminde ilerleyen stres dalga hızı örüntülerini incelemiştir. Bu örüntülerin dikili ağaçların kusur tespitinde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Bergander ve Salmen [327] küçük hücre duvar katmanının, yüksek akustik dalga hızlarına bağlı olarak L yönünde yüksek MoE değerine neden olduğunu göstermiştir.

Sandoz vd. [328] 25 kHz frekanslı transdüser ile gerçekleştirdiği çalışma sonucunda

ultrases hızı ile MoE arasında güçlü ($r^2=0.583$) ve MoR arasında zayıf ($r^2=0.25$) bir ilişki olduğunu belirtmiştir.

Falk vd. [329] akustik dalga ve statik eğilme testlerinden elde edilen MoE değerleri arasında yüksek korelasyon olduğunu belirtmiştir. Oliveira vd. [330]'ne göre ultrasonik test ile elde edilen MoE değerleri statik eğilme testiyle elde edilenlerden genellikle daha yüksektir. Smulski [331] akçaağaç, huş, dişbudak ve meşe ağaçlarının ultrasonik testiyle elde edilen MoE değerlerinin statik eğilme testi ile elde edilenlerden %22 ila %32 arasında daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Benzer sonuçlar (%19-34 fark) Burmester [332] tarafından kayın ve iki tropik sert ağaç için elde edilmiştir. Bu farklılık Halabe vd. [324]'ne göre ağaç malzemenin visko-elastik ve yüksek derecede darbe sönümleyici/emici bir yapıya sahip olmasıyla ilişkilidir.

Cansu [123] Beyşehir gölü havzasından elde ettiği adi ardıç, karaçam, göknar, saçlı meşe, akdut, aksöğüt, Fransız akçaağacı, yaz ıhlamuru ve adi ceviz odunlarının bazı özelliklerini, Şekil 1.19'daki gibi hazırladığı örnekler üzerinden 50Hz boyuna dalga yayılımı ile belirlemiştir. Çalışmada "*Enine ultrases dalgaların hızları, boyuna ultrases dalgalarının hızlarının yaklaşık yarısıdır* [333]" atfına dayanarak ölçülen boyuna dalga hızlarının yarısı alınarak kesme modüllerinin belirlendiği belirtilmiştir.



Şekil 1.19. Cansu [123]'ya ait ultrasonik test örnekleri.

Fakat Şekil 1.19'de görülen test örneklerinden de anlaşılacağı üzere örnek hazırlamada bir standarttan ve ölçüm doğrultusu olarak ağaç malzemenin temel yönlerinin dikkate alındığından bahsedilmemiştir. Zira testlerde de işaretli ölçüm alanları birinci, ikinci ve üçüncü (L) yüzey olarak adlandırılmıştır.

Grossi vd. [334] iki farklı yığma kereste ev konstrüksiyonunda perde (kesme) duvarların davranışını statik olarak test etmiş ve analitik modellemesi ile de karşılaştırmıştır.

Casagrande vd. [335] hafif ahşap çerçeve perde (kesme) duvarlara etki eden yatak yükler sonucu meydana gelen elasto-plastik davranışı incelemiştir.

Bulut [336] lineer-elastik, homojen ve izotrop olarak kabul ettiği silindirik kevlar lifleri ile polyesterden imal silindirik kompozit malzemenin kayma (kesme) modülünü, çekme testi ile elde ettiği elastikiyet modülü ve Poisson oranlarını kullanarak hesaplamıştır.

İşler [337] Elyaf cam-epoksi ve karbon-epoksi ile imal edilmiş ortotropik kompozitlerin kayma (kesme) modüllerini 2,25MHz enine ultrasonik dalga ile elde ettiği hızlar yardımı ile hesaplamıştır.

Kesme modülü elastik özellik iken kesme direnci direnç özelliğidir. Bu bağlamda kesme direnciyle ilgili yapılan çalışmaların da bilinmesinde fayda vardır. Literatüre bakıldığında kesme direnci ile ilgili birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Bu çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Szalai [338] basma testinde hem elyaf hem de yıllık halka açısı varyasyonlarını kapsayan kesme ve normal direnç değerlerini ve elastikiyet modülünü belirleyen eşitliği tensör analizinden türetmiştir.

Cowin [339] ağaç malzeme kesme direncinin, elyaf/lif yönelimi etkisi olmadan Hankinson tipi mukavemet kriterinin karesel ifadesine uyabileceğini belirtmiştir.

Pretzsch ve Rais [340] eğilme, çekme ve kesme direnci gibi özelliklerin sadece tahribatlı yöntemlerle ölçülebileceğini belirtmiştir.

Grekin ve Surini [341] sarıçam odununun liflere dik ve paralel kesme direncini statik yöntemle belirlemiştir.

Kılıç [342] PU ve PVAc tutkalları ile yapıştırılan karaçam teğet ve radyal örneklerin kesme direncine daire testere, kalınlık ve zımpara makinelerindeki işlemlerin etkisini blok kesme testi ile belirlemiştir.

Aicher ve Ohnesorge [343] Avrupa kayınından yapılmış tutkallı lamine kerestenin kesme direncini blok kesme testi ile belirlemiştir.

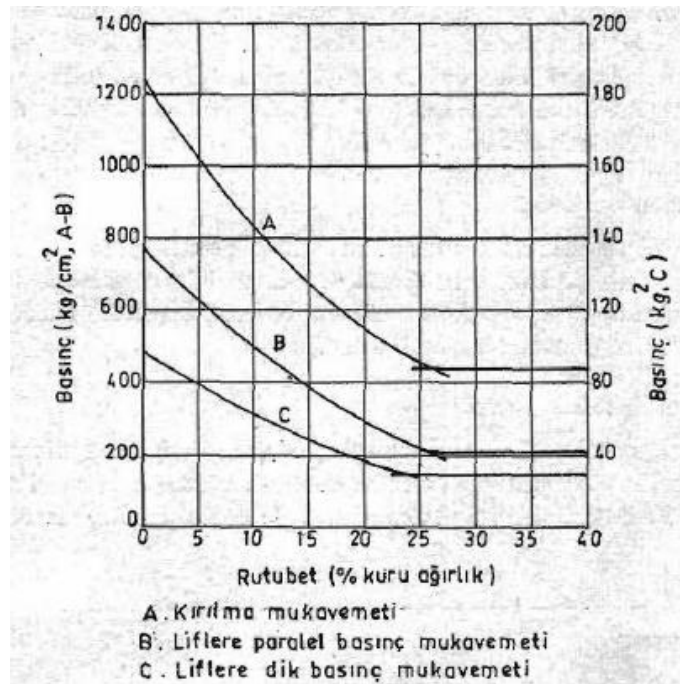
Krajewski vd. [344] sarıçam odunundan yapılmış eski (17 ve 18. yy) ve yeni binaların bazı elemanlarının öz odun kısımlarının liflere paralel kesme dirençlerini belirlemiş ve

eski odunların daha yüksek değerlere sahip olduğunu belirtmiştir.

Wang vd. [345] masif ve farklı tutkal ile birleştirilen sarıçam odununun 20°C'den 50°C'ye kadar olan sıcaklıklardaki kesme direncini belirlemiş ve sıcaklık azalımı ile kesme direnci düşüş oranlarını belirlemiştir.

Knorz vd. [346] farklı tutkallar ile lamine edilmiş dişbudak örneklerinin kesme direncini blok kesme testiyle belirlemiştir. Temiz vd. [347] plazma modifiyesi yapılmış kontrplağın yapışmada kesme direncini incelemiştir. Burdurlu vd. [348] PU ve PVa ile teğet ve radyal olarak ayrı ayrı yapıştırılmış kızılçam odununun kesme direncini blok kesme testiyle belirlemiştir. Niemz vd. [349] PRF ve PUR tutkalları ile yapıştırılmış $674 \pm 68 \text{ kg/m}^3$ ve %8 rutubetli dişbudak odununun kesme direncini çekme testi ile belirlemiştir. Kral vd. [350] PVAc ve PU tutkallarıyla yapıştırılmış meşe ve kayın odunlarında dış ortamdaki hidrotermal etkilerin yapışma hattına yaptığı etkiyi kesme direnci açısından incelemiş ve PVAc'nin dış ortam için daha uygunsuz olduğunu belirtmiştir. Konnerth vd. [351] MUF, PU ve PRF tutkalları ile yapıştırılmış dokuz farklı Avrupa ağacı odunu kesme direncini çekme testiyle belirlemiştir. Vasiliki ve Ioannis [352] PU ve PVAc tutkalları ile birleştirilmiş beyaz çiçekli yalancı akasya ve kayın odunlarının kesme direncini 50x40x20mm'lik örneklerle belirlemiştir.

De Melo ve Del Menezzi [353] *Schizolobium amazonicum* lamine kaplama kerestenin kesme direncini belirlemiştir.



Şekil 1.20. Ağaç malzeme mukavemetinin rutubet ile değişimi [354].

Uluata [355] çalışmasında ağaç malzemenin mekanik özelliklerine etki eden faktörleri incelemiştir. Şekil 1.20’de görüldüğü üzere ağaç malzemedeki su oranı artıkça basma, çekme, eğilme ve kesme direncinin azaldığı ve değerlerin, malzemedeki su miktarı lif doygunluğu noktasına gelince sabit kaldığı belirtilmiştir.

Çerçeve elemanlarının birleşim yerlerine, boy ekseninde çekme ve basınç, boy eksenine dik yönde kesme, zıt yönlerde ise eğilme veya döndürme kuvvetleri etki eder [356]. Bu konu ile ilgili Efe vd. [357] yapışma yüzeylerindeki tutkal hattında oluşan kesme direncinin, kavela ve zıvanalı tutkallı konstrüksiyonlarda önemli olduğunu belirtmiştir.

Can ve Tokgöz [358] %12 rutubetli 2. sınıf sarıçam ağaç malzemenin liflere paralel kesme direncini 5,44-6,47N/mm² olarak belirtmiştir. Çalışması sonucunda kesme kuvveti ile ön ahşap uzunluğu arasında sıkı bir ilişki olduğu sonucuna varmış ve çatı hesaplarının mutlaka yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Riyanto ve Gupta [359] torsiyon, üç, dört ve beş nokta eğilme testleri ile tam boy Douglas fir yapısal kerestelerinin liflere paralel kesme direnci değerlerini sırası ile 12,65, 9,07, 6,44 ve 11,09N/mm² olarak hesaplamıştır. Bu testlerden elde edilen kesme direnci değerleri arasında anlamlı bir doğrusal ilişki olduğu belirtilmiştir.

Çağatay vd. [360] bazı ağaç türlerinin vida tutma direncini belirlediği çalışmada bu türlerin liflere paralel kesme direncini Çizelge 1.6’da görüldüğü üzere belirtmiştir.

Çizelge 1.6. Bazı ağaç türlerinin liflere paralel kesme dirençleri.

Ağaç türü	Rutubet İçeriği (Rİ) (%)	Rİ ≈ % 8 Yoğunluk (gr/cm ³)	Tam Kuru Yoğunluk (gr/cm ³)	Liflere Paralel Kesme Direnci (N/mm ²)
Ceviz	8,3	0,62	0,61	18,08
Meşe	8,61	0,76	0,74	19,41
Kayın	8,49	0,71	0,69	15,23
Kestane	8,41	0,48	0,46	10,16
Sarıçam	8,64	0,47	0,46	10,74

Bal ve Özyurt [361] cam elyaf ile güçlendirilmiş LVL levhaların (cam elyaf dokuma ve kavak kaplama tabakalı kereste) hava kurusu hal çekme-kesme direncini Çizelge 1.7’deki gibi elde etmiştir. Tutkal uygulaması 200 g/m² ve 7 kg/cm² presleme basıncı ile gerçekleştirilmiş ve testler 1 hafta sonra yapılmış. Çekme-kesme direnci TS EN 314-

1 [362] ve TS EN 314-2 [363] standartlarına göre yapılmıştır.

Çizelge 1.7. Hava kurusu örneklerde çekme-kesme değerleri.

		Tutkal Tabakası		
		3	4	5
Kontrol	Ort. (N/mm ²)	4,76	5,01	5,34
	OK (%)	77	50	50
B grubu	Ort. (N/mm ²)	3,62	4,35	3,35
	COK (%)	28	12	18

Ort: ortalama, OK: odun kırılması, COK, cam elyaf kırılması

As vd. [364] Türkiye’de yetişen ağaç türlerini, kesme direnç değerine göre Çizelge 1.8’deki gibi sınıflandırmıştır.

Çizelge 1.8. Kesme direncine göre ağaç türlerinin sınıflandırılması.

Kesme Direnci (N/mm ²)	Ağaç türleri
< 6,5	Uludağ göknarı, Kazdağı göknarı, adi kızılbaş, boylu ve kokulu ardıç, doğu ladini, karaçam, Sahil çamı, fıstık çamı, karakavak, Douglas göknarı, dişbudak yapraklı ceviz, büyük yapraklı ıhlamur
6,5-8,5	Toros göknarı, gürgen, kestane, Toros sediri, dallı servi, adi ceviz, kızılçam, halep çamı, aksögüt, titrek kavak, adi Douglas, kasnak meşesi, dağ karaağacı, Avrupa ladini
8,5-10,5	Çınar yapraklı akçaağaç, dağ akçaağacı, doğu kayını, Avrupa melezi, sarıçam, doğu çınarı, çoruh meşesi, kayın gövdeli akçaağaç, sivri meyveli dişbudak, ıstranca meşesi
10,5-12,5	Kuş üvezi
>12,5	Piramit servi, yalancı akasya, adi dişbudak, gürgen yapraklı kayacık

Efe ve Çağatay [365] bazı türlerin liflere paralel kesme direncini tespit etmek için örnekleri 20±2°C ve 45±5 bağıl nemde şartlandırarak %8 rutubet içeriği elde ettikten sonra ve TS 3459 [366]’a göre test etmiştir. Blok kesme yöntemi ile elde edilen değerler Çizelge 1.9’da görülmektedir.

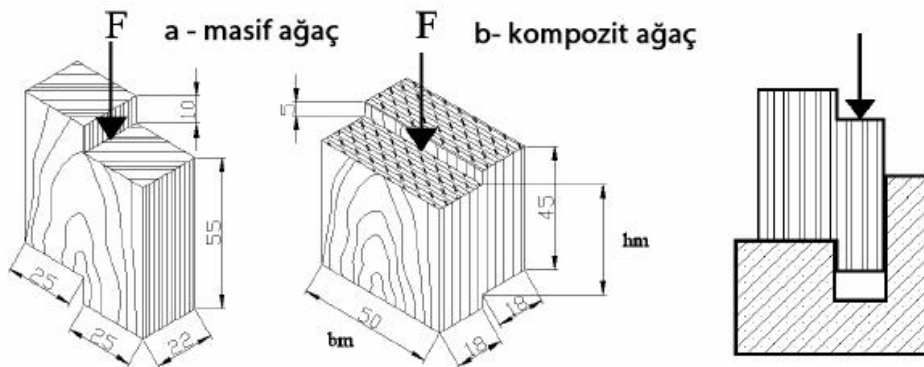
Çizelge 1.9. Blok kesme testi ile elde edilen kesme direnç değerleri.

Tür	Rutubet (%)	Yoğunluk (g/cm ³)		Kesme direnci (N/mm ²)		
		Tam kuru	Hava kurusu	min.	maks.	ort.
Ceviz	8,31	0,61	0,62	16,18	19,16	18,08
Meşe	8,61	0,74	0,76	16,32	21,92	19,41
Kayın	8,49	0,69	0,71	14,57	16,03	15,23
Kestane	8,41	0,46	0,48	8,95	10,77	10,16
Sarıçam	8,64	0,46	0,47	9,55	13,22	10,74

Efe ve Kasal [367] bazı masif ve kompozit ağaç malzemelerin liflere veya yüzeye paralel kesme direncini sırası ile TS3459 [366] ve TS5192 [368]'ye göre belirlemiştir. Çalışmada Şekil 1.21'de detayları görüldüğü üzere blok kesme yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen kesme direnci değerleri Çizelge 1.10'da görülmektedir.

Çizelge 1.10. Kesme direnci değerleri

Malzeme	Rutubet (%)	Yoğunluk (g/cm ³)		Kesme direnci (N/mm ²)		
		Tam kuru	Hava kurusu	Min.	Maks.	Ort.
Doğu kayını	10,2	0,63	0,65	8,98	11,78	10,31
Sarıçam	11,2	0,5	0,52	5,65	6,6	6,21
Okume Kontrplak	9,1	0,54	0,57	7,69	9,33	8,98
MDF	7,1	0,67	0,69	5,17	6,26	5,54
OSB	7,6	0,57	0,59	4,49	6,74	5,68



Şekil 1.21. Blok kesme yöntemine göre hazırlanan örnekler.

Toksoy vd. [369] tarafından gerçekleştirilen çalışmada kayın ve kızılâğaçtan (3 tabaka 500x500x2mm'lik levhalardan) üretilmiş kontrplağın çekme-kesme direnci 2,75N/mm²

olarak belirlenmiştir.

Tan [370] ladin ve göknar kontrplakların çekme-kesme direncini belirlemiştir.

Güler ve Çolakoğlu [371]'nin farklı koşullarda (DIN 53255 [372] ve TS 47 [373]'ye göre) üretilen üç tabakalı kızılçam kontrplaklarda belirlediği çekme-kesme direnci değerleri Çizelge 1.11'de görülmektedir. Çalışma sonucunda yüzey pürüzlülüğü ile çekme-kesme direnci arasında ters ilişki olduğu belirtilmiştir.

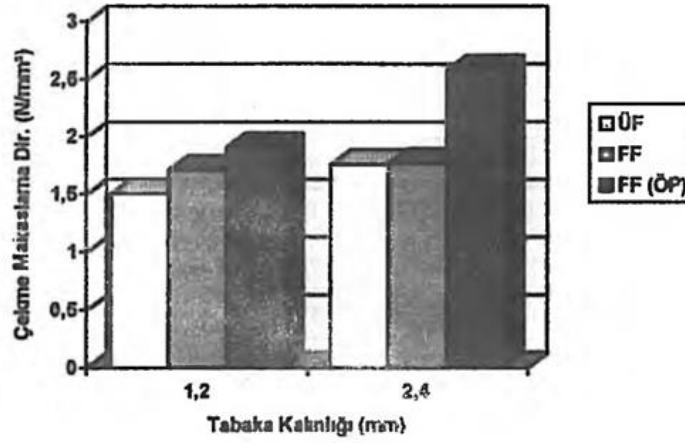
Çizelge 1.11. Kızılçam kontrplak çekme-kesme direnci.

Ön İşlem	Ort. Yüzey Pürüzlülüğü (μm)	Çekme-kesme Direnci (N/mm^2)
Buharlanmış, Doğal Kur. 1,2mm- I	8,1	2,11
Buharlanmış Doğal Kur. 1,2mm- II	9,35	2,13
Buharlanmış, Teknik Kur. 1,2mm- III	12,44	1,95
Buharlanmış, Teknik Kur. 1,2mm- V	12,06	1,78

Çakıroğlu ve Aydın [374] TS EN 314-1 [362] standardına göre kayın ve huş kaplama ve ÜF tutkalı ile üretilen kontrplakların çekme-kesme direncini belirlemiştir. Kayın kontrplak ($0,752\text{g}/\text{cm}^3$ yoğunluklu) $2,694\text{N}/\text{mm}^2$ ve huş kontrplak ($0,734\text{g}/\text{cm}^3$ yoğunluklu) $2,453\text{N}/\text{mm}^2$ ortalama değer göstermiştir.

Yihai ve Lee [375] güney çamı ve sarı kavaktan yapılmış paralel şerit kerestenin kesme dirençlerini kenar için sırası ile $8,4$ ve $8,4 \text{ N}/\text{mm}^2$, yüzey için ise $7,2$ ve $7,6 \text{ N}/\text{mm}^2$ olarak bulmuştur.

Güler ve Çolakoğlu [376] tam kuru özgül ağırlığı $0,46\text{g}/\text{cm}^3$ olan kızılçam kaplamaları $160\text{g}/\text{m}^2$ tutkal (FF ve ÜF) ile 130°C sıcaklıkta $12\text{kg}/\text{cm}^2$ basınç ile presleyerek kontrplak elde etmiş ve Şekil 1.22'de görülen çekme-kesme dirençlerini DIN 53255 [372] standardına göre belirlemiştir.



Şekil 1.22. Kızılcım kontrplak çekme-makaslama direnci.

Keskin [377] %12 rutubetli ve $0,4 \text{ g/cm}^3$ özgül ağırlığındaki kıızılcım ağaç malzemenin en yüksek kesme dayanıklılığını 34 kg/cm^2 olarak belirtmiştir.

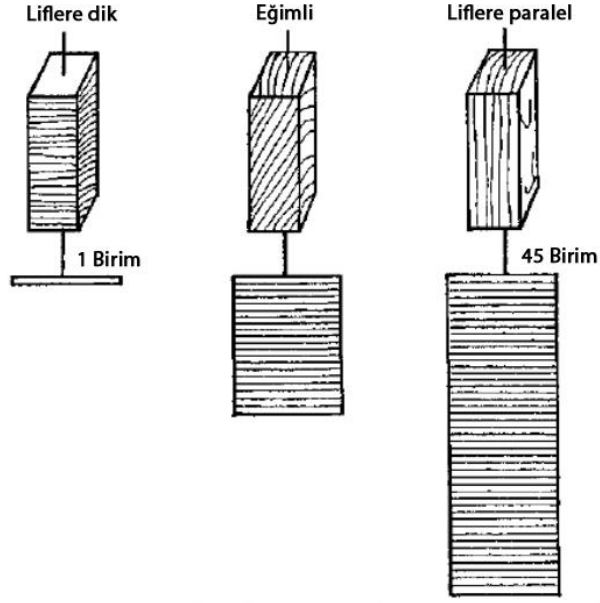
Keskin [378] tutkallı birleştirmelerde en çok kullanılan mekanik deneylerden birinin kesme deneyi olduğunu belirtmiş ve 0519 g/cm^3 hava kurusu yoğunluklu lamine sarıçam malzemenin kesme direncini ASTM D3110 [379]'a göre $8,33 \text{ N/mm}^2$ olarak belirlemiştir. Bu değeri masif malzemedede $7,99$ olarak belirtmiştir.

Keskin vd. [380] $0,511 \text{ g/cm}^3$ hava kurusu yoğunluğa sahip sarıçamın liflere paralel kesme direncini $8,21 \text{ N/mm}^2$ olarak belirlemiştir. $0,537 \text{ g/cm}^3$ yoğunluklu lamine sarıçamda ise bu değeri $8,47 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplamış ve bu farklılıkların laminasyonda kullanılan yapıştırıcının düzgün lifli lameller arasında odunun kohezyon kuvvetini arttırmasından kaynaklanabileceğini belirtmiştir.

Eriç [30] $0,5 \text{ gr/cm}^3$ birim ağırlığa sahip çam masif malzemenin kesme direncini $3,6 \text{ N/mm}^2$ olarak belirtmiştir.

Özkaya [381] Denizli Eskere orijinli kıızılcım odununun R yönündeki kesme direncini 12 örnek üzerinden TS 3459 [366]'a göre $6,613 \text{ N/mm}^2$ olarak belirlemiş ve bu değeri, Antalya, Samsun ve Kahramanmaraş orijinlerinin sırasıyla $9,274$, $6,931$ ve $7,174 \text{ N/mm}^2$ olan kesme direnci değeriyle karşılaştırmıştır.

Wallis [382]'e göre kesme gerilmesi, Şekil 1.23'de görüldüğü üzere liflere paralel ya da dik olabilir. Fakat kesme bakımından ağaç malzeme liflere dik yönde lif doğrultusuna göre daha kuvvetlidir. Liflere dik yönde gerçek kesme direncini elde etmek çok zordur.



Şekil 1.23. Liflere dik, paralel ve açılı kesme gerilmeleri.

Won vd. [383] farklı çaplardaki karaçam odunu disklerinde *M. Thunbergianae*'nın neden olduğu kusurların kesme direncine etkisini incelemiştir ve kusurlu odunlarda kesme direncinin daha yüksek olduğunu belirlemiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. MALZEME

Çalışmada, kızılçam (*Pinus brutia* Ten.), karaçam (*Pinus nigra* Arnold.) ve sarıçam (*Pinus silvestris* L.) olmak üzere üç farklı ağaç malzeme kullanılmıştır. Kızılçam ağaç malzeme Burdur ilinin Bucak ilçesi Beşkonak köyünden 4m'lik tomruklar halinde temin edilmiştir. Karaçam ağaç malzeme, Isparta ili Sütçüler Orman İşletme Müdürlüğü'ne bağlı Karadağ İşletme Şefliği'nden 5m'lik tomruk halinde temin edilmiştir. Sarıçam ağaç malzeme, Bolu Aladağ Orman İşletme Müdürlüğü'nden tomruk halinde temin edilmiştir. Tomruklar, silindirik formlu, yüzeyi düzgün, düzgün lifli ve budaksız olup böcek yeniği, şişlik, ikiz özlülük, donma çatlağı, ur, eksantrik büyüme, öz veya halka çatlağı, çürüklük, oluklu gövde oluşumu kusurları olmayan kök veya uç tomruğu haricindekiler arasından seçilmiştir.

2.1.1. Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.)

Pinaceae ailesinin bir türü olan kızılçam, Kayacık [384] ve Yaltırık [385]'a göre en fazla Türkiye'de ve İltter vd. [386]'ne göre de Türkiye'de en geniş yayılım gösteren çam türüdür. Bu nedenle Kızılçam "Turkish red pine" olarak bilinmektedir [387]. Kızılçam, 25m boy ve 60 cm kadar çap yapabilen [388], ülkemizde 1500m rakıma kadar yetişebilen, Batı Anadolu ve Akdeniz bölgesinde geniş bir yayılışa sahip doğal olarak yetişen ve en hızlı büyüyen önemli bir orman ağacıdır [389]. Bozkurt vd. [390]'e göre kızılçamlara ülkemizde genel olarak 600-850m yükseltiler arasında rastlanmaktadır. Doğu Akdeniz çam türlerinden olan *Pinus brutia* Ten. en elverişli ve iyi yayılışını Türkiye'de sergiler [391]. Bunun dışında Akdeniz ikliminin görüldüğü mikro klima bölgelerinde de küçük öbekler halinde görülmektedir. Yapı malzemesi, mobilya ve ambalaj sanayisinde kullanılan kolay işlenebilen bir oduna sahiptir [389]. Bunun yanında direk, travers, kaplama, gemi-tekne yapımında da kullanılmaktadır [392]. Erten [393]'e göre kızılçamın emprenye edilmesi kolaydır. Usta [394]'ya göre kızılçam kabuğundaki ekstraktif madde miktarı yüksektir ve bunlar Demetçi [395]'ye göre tanen tutkallarının üretiminde önemli bir hammadde kaynağıdır. Topçuoğlu ve Eren [396]

kızılçam yuvarlak odununda ortalama 2,5mm kuruma payı olduğunu belirtmiştir. Bakım kesimi amacıyla kesilmiş kızılçamın kağıt yapımı için uygun olduğu belirtilmiştir [397].

2.1.1.1. *Makroskopik Ve Mikroskopik Özellikler*

Kızılçam odununun 1mm² kesitinde ortalama 756 traheid bulunmakta ve çapları sarıçam odunundan daha büyük olmaktadır. Sarıçam ile karaçam arasındaki uzunluğa sahip trahedileri bulunmaktadır. Özışın sayısı 1mm²'de ortalama 21,62 iken 1mm'de 3,72'dir. Sarıçam ve karaçama göre daha büyük reçine kanal çaplarına sahip olduğu belirtilmektedir [398]. Yıldız [399]'a göre poroz bir yapıya sahip olmasının nedeni orta yoğunluklu olmasıdır ve genellikle odun-polimer kompoziti üretimi için elverişlidir.

Makroskopik olarak geniş ve kırmızımsı beyaz renge sahip olan kızılçam diri odunu enine kesitte gövde yarıçapının yaklaşık üçte ikisini oluştururken öz odun daha koyudur. Belirgin yıllık halka sınırlarına sahiptir. Çok fazla reçine kanalı içermekte ve bu kanalların geneli belirginken öz odun reçinece zengindir. Orta ağırlıkta ve çok yumuşak bir oduna sahip olan kızılçam odununda yarılmalar kolaylıkla gerçekleşir [400].

Mikroskopik olarak kızılçam odununda yaz ile ilkbahar odunu arasındaki geçiş ani değildir hatta bazen geçiş sınırı belirgin olmayabilmektedir. 60-140µ arasında olan reçine kanalları, daha çok yaz odununda görülmektedir. Enine kesitte yıllık halka iştirakindeki yaz odunu çok düşüktür [400].

Radyal kesitte, ilkbahar odununda 24µ boyutunda haleli geçit bulunurken yaz odununda haleli geçit boyutu yarı yarıya ve sıklığı daha düşüktür [400].

Öz ışınları, teğet kesitte homojen olmayıp tek sıralı hücrelerden oluşmaktadır. Yatık ve dik reçine kanalları mevcuttur ve öz ışınlar, reçine kanalı ihtiva ettiğinde daha fazla (en fazla 36 hücre sırası) yüksekliğe sahip olabilmektedir [400].

Göksel [401]'e göre lif boyu, lif genişliği, çeper kalınlığı ve lümen genişliği sırası ile 4,27-4,7mm, 47,85-49,11µ, 8,99-9,77µ ve 28,14-30,34µ arasında değişmektedir.

Holoseluloz, lignin, pentozan, alfa seluloz, kül oranı ve hacim ağırlık değeri sırası ile %64,52-66,13, %27,18-27,86, %9,23-10,47, %41,21-43,92, %0,4-0,5 ve 0,471-0,520g/cm³ arasında değişmektedir [401].

2.1.1.2. *Fiziksel Ve Mekanik Özellikler*

Kızılçam odunun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Kızılcam odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik	Kaynak				
	As vd. [392]	Özkaya [381]	Güntekin vd. [402]	İlter vd. [386]	Erten ve Önal [403], Toker [404]
Tam Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	0,53	0,532	-	0,566	0,53
Hava Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	0,57	0,567	-	0,602	0,57
Hacim Ağırlık Değeri	0,478	-	-	-	-
Radyal Daralma (%)	4,9	-	-	-	-
Teğet Daralma (%)	6,8	-	-	-	-
Hacmen Daralma (%)	12,2	-	-	-	-
Basma Direnci (N/mm ²)	45	60,67	-	63	43,83
Eğilme Direnci (N/mm ²)	82	95,89	-	97,84	80,56
Elastikiyet Modülü (N/mm ²)	-	9650,7	11555	-	-
Çekme Direnci (N/mm ²)	47	81,69	-	97,66	-
Kesme Direnci (N/mm ²)	7	6.61 (R)	-	9,09	-
Dinamik Eğilme (kN/cm)	0,26	-	-	-	-
Radyal Yarıлма Direnci	0,51	-	-	-	-
Teğet Yarıлма Direnci	0,57	-	-	-	-
Liflere Paralel Sertlik (N/mm ²) (Janka)	36,7	-	-	-	-
Liflere Dik Sertlik (N/mm ²) (Janka)	25,3	-	-	-	-

İlter vd. [386] Antalya, Hatay, Adana, Muğla, Samsun, Maraş, Mersin ve Burdur illerinde yetişen kızılçam odununun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemiştir. Bu sonuçlardan Antalya ve Burdur verileri Isparta'ya yakınlığı nedeni ile Çizelge 2.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 2.2. Antalya ve Burdur yöresi kızılçamının fiziksel ve mekanik özellikleri.

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Birim	Yetiştığı Yer	
		Antalya	Burdur
Tam Kuru Birim Hacim Ağırlık	g/cm ³	0,541	0,566
Hava Kurusu Birim Hacim Ağırlık	g/cm ³	0,58	0,602
Hacim Yoğunluk	g/cm ³	0,47	0,491
Radyal Çekme	%	6,31	5,34
Teğet Çekme	%	7,39	6,58
Hacimsel Çekme	%	12,4	10,87
Radyal Şişme	%	6,33	5,44
Teğet Şişme	%	7,65	7,16
Hacimsel Şişme	%	14,39	13
Liflere Paralel Basınç Dayanımı	kgf/cm ²	599,73	642,44
Statik Kalite Değeri	-	11,77	14,18
Liflere Paralel Çekme Gerilmesi	kgf/cm ²	796,43	995,9
Statik Eğilme Dayanımı	kgf/cm ²	1145,2	997,71
Kesme Dayanımı	kgf/cm ²	94,57	92,79

Öktem ve Sözen [405] reçine üretiminin odunun fiziksel özelliklerinde kayda değer bir değişmeye neden olmadığı fakat mekanik özelliklerde artışa neden olduğunu belirtmiştir.

2.1.2. Karaçam (*Pinus nigra* Arnold.)

Türkiye’de hemen hemen her bölgede görülen, 400-2100m yükseltilerde yayılım gösteren, 40m kadar boy ve 1m’den fazla çap yapabilen düzgün gövdeli bir ağaçtır. Sert, dayanıklı, reçineli ve kaliteli oduna sahiptir [389]. İşlenmesi kolay, çivi ve vida tutma direnci iyi olduğu için yapı malzemesi olarak [126], direk, tavers, kaplama, mobilya, gemi-tekne yapımında [406] kullanılmaktadır.

2.1.2.1. Makroskobik Ve Mikroskobik Özellikler

Karaçam, sarımsı ve kırmızımsı beyaz renkte olan diri odunu neredeyse yarıçapın yarısı kadar olan öz odun kırmızımsı kahverengindedir. Düzenli daire şeklinde olan yıllık halkaların geçiş sınırları belirgindir. Morumsu koyu kahverengi yaz odunu vardır. Mat bir enine kesit görünümü varken teğet kesitte yaz odunu şeritleri sarıçama göre daha

koyu renge sahiptir [126].

2.1.2.2. Fiziksel Ve Mekanik Özellikler

Tam kuru ve hava kurusu yoğunluğu sırasıyla $0,52\text{g/cm}^3$ ve $0,56\text{g/cm}^3$ 'tür. Liflere paralel basma, çekme ve liflere dik çekme direnci sırasıyla 479 kg/cm^2 , $11,33479\text{ kg/cm}^2$ ve $23,4479\text{ kg/cm}^2$ 'dir [126].

Dursunbey yöresine ait karaçamın bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.3'deki gibi belirtilmiştir.

Çizelge 2.3. Karaçam odunun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik	Kaynak	
	As vd. [392]	Göker [407]
Tam Kuru Yoğunluk (g/cm^3)	0,54	0,52
Hava Kurusu Yoğunluk (g/cm^3)	0,59	0,56
Hacim Ağırlık Değeri	$0,47\text{ (g/cm}^3)$	$456\text{ (Kg/m}^3)$
Lif Yönü Daralma (%)	-	0,23
Radyal Daralma (%)	3,57	5,58
Teğet Daralma (%)	7,05	8,19
Hacmen Daralma (%)	10,62	13,9
Basma Direnci	$56,93\text{ (N/mm}^2)$	$479\text{ (Kg/cm}^2)$
Eğilme Direnci	$119,9\text{ (N/mm}^2)$	$1096\text{ (Kg/cm}^2)$
Elastikiyet Modülü (N/mm^2)	7061,7	-
Çekme Direnci (N/mm^2)	117,02	-
Makaslama Direnci (N/mm^2)	6,29	-
Liflere Paralel Sertlik (N/mm^2)	41,94	-
Liflere Dik Sertlik (N/mm^2)	23,8	-

2.1.3. Sarıçam (*Pinus silvestris* L.)

Gymnospermae sınıfından, Pinacea familyasının Pinus cinsinin bir türü olan sarıçam, 20-45m'ye kadar uzayabilen, gövdesi narin ve silindirik olan, sivri tepeli ve ince dallı ya da gövdesi dolgun, tepesi yayvan ve dalı kalın bir ağaçtır [408]. Diğer tüm çamlardaki gibi sarıçamda da kromozom sayısı $n=12$ ve $2n=24$ 'dür [409]. Eliğin [409]'e göre yetiştirme yeri kabuk yapısında belirgin farklılıklara neden olur. Mevcut çam türleri

içerisinde en geniş coğrafi yayılış gösteren türdür ve Türkiye'deki doğal yayılış sahaları, kışları uzun, karlı ve soğuk dağlık alanlardır [410]. Aksoy [411]'a göre Türkiye'nin kuzey kısımlarında yayılış gösterir ve Gökmen [388]'e göre genellikle kuzey bakılı yamaçları sever. Türkiye'de Of-Sürmene arasında deniz seviyesine kadar inerken Doğu Anadolu'da Sarıkamış-Ziyaret Tepesi ile 2700m'ye kadar çıkabilmektedir. Fakat Türkiye'deki toplu yayılışı ortalama 1000-2500m arasında olmaktadır. Dünyadaki en güney yayılış noktalarından biri ise Kayseri-Pınarbaşı'dır. Sarıçam, dolgun ve düzgün gövdeli ve 20-50m arası boy yapabilen dayanıklı ve reçineli bir ağaçtır [389].

Tetik [410]'e göre kerestesinin üstün teknolojik vasıfları ve geniş kullanım alanları vardır. Tutkalı ve üst yüzey katman yapıcıları kolay emdiğinden, işlenmesi çok kolay ve çivi tutma kabiliyeti iyi olduğundan mobilyacılık ve oymacılığın yanında yapı malzemesi olarak kapı, pencere, taban kaplaması [389], direk, travers ve gemi-tekne yapımında [406] kullanılır.

2.1.3.1. Makroskobik Ve Mikroskobik Özellikler

Berkel [40]'e göre sarımsı ya da kırmızımsı beyaz renge sahip geniş bir diri odunu vardır. Özodun, enine kesitte gövde yarıçapının hemen hemen üçte birini teşkil eder. Özodun sınırı belirgin ve ekseriyetle yuvarlaktır. Özodun, diri oduna göre daha koyu kırmızımsı kahverengi renge sahiptir. Yıllık halka sınırları, enine, radyal ve teğet kesitte çok belirgin olmakla birlikte hafif dalgalıdır. İlkbahar odunu ile yaz odunu arasındaki geçiş, belirgin olup bazı ağaçlarda geçiş ani olmamaktadır. Yıllık halka içinde yaz odunu katılım payı, %2-73 arasındadır [412]. Boyuna ve teğet kesitte parlak bir görünümü vardır. Genellikle geniş ve çok miktarda reçine kanalı ihtiva eder. Zengin ve dar özışınları mevcuttur. Reçinece zengin, oldukça hafif ve yumuşak olan kaba lifli odunu, kolaylıkla ve düz hatlar halinde yarılr [413].

Mikroskobik olarak sarıçam odununun enine kesitinde yaz odunundan ilkbahar odununa geçiş tedricidir. Toker [412]'e göre kalın çeperli yaz odunu traheidleri, ince çeperli ilkbahar trahedileri içerisinde diller halinde uzanmaktadır. 80-125 μ rasında değişen reçine kanalları, düzensiz bir biçimde olmakla beraber en çok yaz odununda yer almaktadır [409]. Özışınları sadece bir sıra paranşim hücrelerinden oluşur [413].

Radyal kesitte traheidlerin içinde tek sıra halinde dizilmiş olan kenarlı geçitler, ilkbahar odununda fazla miktarda ve büyük iken yaz odununda seyrek ve küçük kenarlıdır [413]. Radyal yöndeki traheid boyları, 328,98 ile 41,86 μ arasındadır [409]. Teğet kesitte

kenarlı geçit büyüklüğü, özışın hücre yüksekliği ve genişliği sırası ile 11,27-19,32 μ , 22,54-29,98 μ ve 9,66-14,49 μ olarak belirtilmiştir. Birkaç sıra halinde dizilmiş paransım hücrelerine sahiptir. Özışınları genellikle tek sıralıdır [413].

Yıllık halka genişliği Batı Karadeniz orijini için 0,54-8,79mm arasındadır. Özodunu mantara karşı daha dayanıklıdır. Ağaç ekseni doğrultusunda uzanmayan kıvrık lifli oduna sahip olabilmektedir. Toker [412] Bolu-Aladağ orijininde lif kıvrıklığının 21°'ye kadar çıkabildiğini ve ağacın yaşlanması ile lif kıvrıklığının artış gösterdiğini belirtmiştir. Sarıçam odunu %41,9 seluloz, %29,5 lignin, %12,8 heksozan, %8,7 pentozan, %3,2 yağ ve %1,3 kül içermektedir [413].

2.1.3.2. Fiziksel Ve Mekanik Özellikler

Farklı araştırmacılar tarafından belirtilen sarıçam odunun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Sarıçam odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik	As vd. [392]	Korkut vd. [414]	Toker [412]
Tam Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	0,496		0,496
Hava Kurusu Yoğunluk (g/cm ³)	0,526		0,526
Hacim Ağırlık Değeri	0,426 (g/cm ³)		426 (Kg/m ³)
Radyal daralma (%)	4,3		4,3
Teğet Daralma (%)	8,3		8,3
Hacmen Daralma (%)	12,7		12,7
Basma Direnci	64 (N/mm ²)	59,7 (N/mm ²)	649 (Kg/cm ²)
Eğilme Direnci	100 (N/mm ²)	138 (N/mm ²)	649 (Kg/cm ²)
Elastikiyet Modülü (N/mm ²)	12000	1472,8	
Çekme Direnci (N/mm ²)	104	3,4*	21,1*
Makaslama Direnci (N/mm ²)	10		
Dinamik Eğilme (kN/cm)	0,4		
Radyal Yarıma Direnci	0,91		9,1
Teğet Yarıma Direnci	0,95		9,5
Liflere Paralel Sertlik (N/mm ²)	40	30,5 (R) Janka	
Liflere Dik Sertlik (N/mm ²)	19	30,5 (T) Janka	

*Liflere dik

Hava kurusu rutubetteki (%15) sarıçam odununun liflere paralel ve dik Brinell sertlik değeri ortalama $2,36\text{kg/mm}^2$ ve $0,77\text{kg/mm}^2$ olarak belirlenmiş ve çok yumuşak bir ağaç olduğu değerlendirilmiştir [412].

2.2. YÖNTEM

2.2.1. Test Örneklerinin Hazırlanması

Tüm tomruklar, Teğet ve Radyal kesitte yıllık halka açısı dikkate alınarak biçilmiş ve kurumaya bırakılmıştır. Rutubet içerikleri, kurumu süresince düzenli olarak RAM DT 129 ağaç nemi ölçme cihazı ile ölçülmüştür. Hava kurusu rutubetteki örnekler, birinci sınıf ağaç malzemedir, düzgün lifli, budaksız, çatlaksız ve yoğunluk farkı olmayan, diri odun kısımlarından TS2470 [12] esaslarına göre hazırlanmıştır.

2.2.1.1. Tahribatsız Test Örneklerinin Hazırlanması

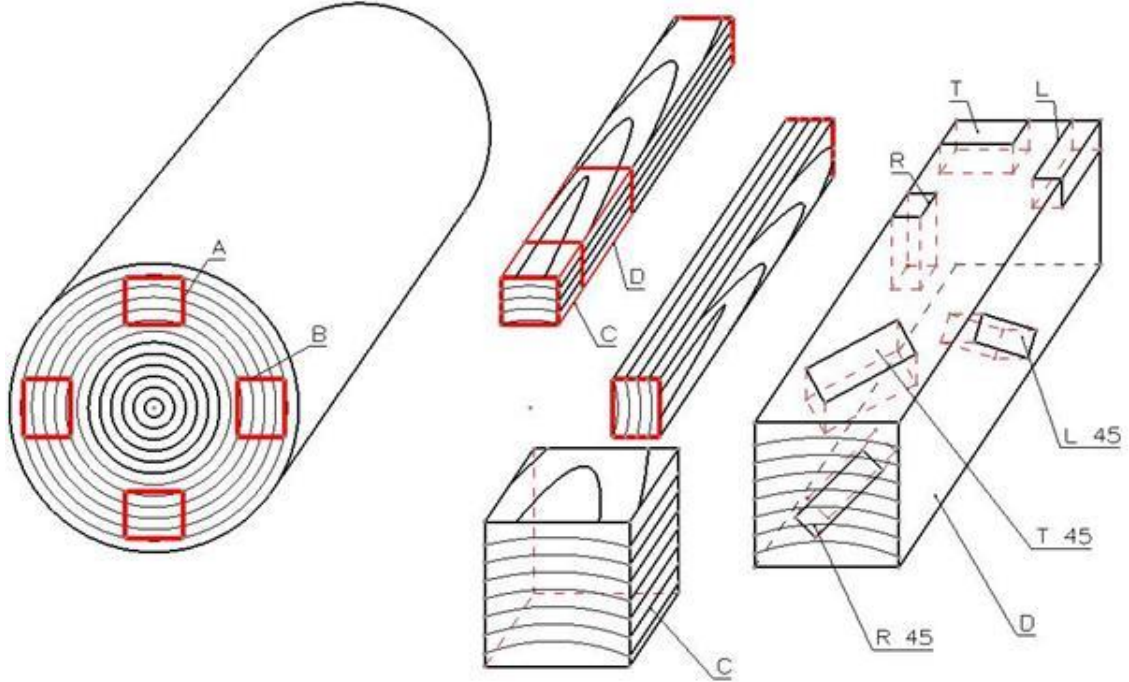
Hava kurusu rutubetteki keresteler, şerit testere ile $75\times 75\text{mm}$ enine kesit ve muhtelif boylarda kare prizma olarak Şekil 2.1’de görüldüğü gibi ebatlanmıştır. Kaba kare prizma malzemeler, profil freze makinesinde dört yüzü temizlenerek $64\times 64\pm 0,5\text{mm}$ ’lik nihai ölçülere getirilmiştir.



Şekil 2.1. Test örneklerinin hazırlanışı.

Unimat profil freze makinesi (Michael Weing AG, Germany) ile elde edilen kare prizmalar, daire testere ile $64\times 64\times 64\pm 0,5\text{mm}$ ölçülerinde kesilerek, Şekil 2.2 C ile belirtilen küp örneklerden tahribatsız muayene test örnekleri hazırlanmıştır. Fakat 26 yüzeyle polihedron test örneklerinin yoğunluğunun belirlenebilmesi çok karmaşık ve zor olduğu için küpler $20\pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %45, 65, 75 ve 85 bağıl nemde kondisyonlanmış

ve yoğunlukları belirlendikten sonra Şekil 2.4'deki gibi kesilerek tam anlamıyla simetrik özellik sergileyen, birbirine paralel 26 yüzeyli tahribatsız test örnekleri elde edilmiştir. Tahribatsız test örnekleri, kesim işlemi süresince meydana gelen rutubet içeriği değişiminin dengelenmesi için bir süre daha aynı koşullarda kondisyonlandıktan sonra test edilmiş ve sonrasında rutubet içerikleri belirlenmiştir.

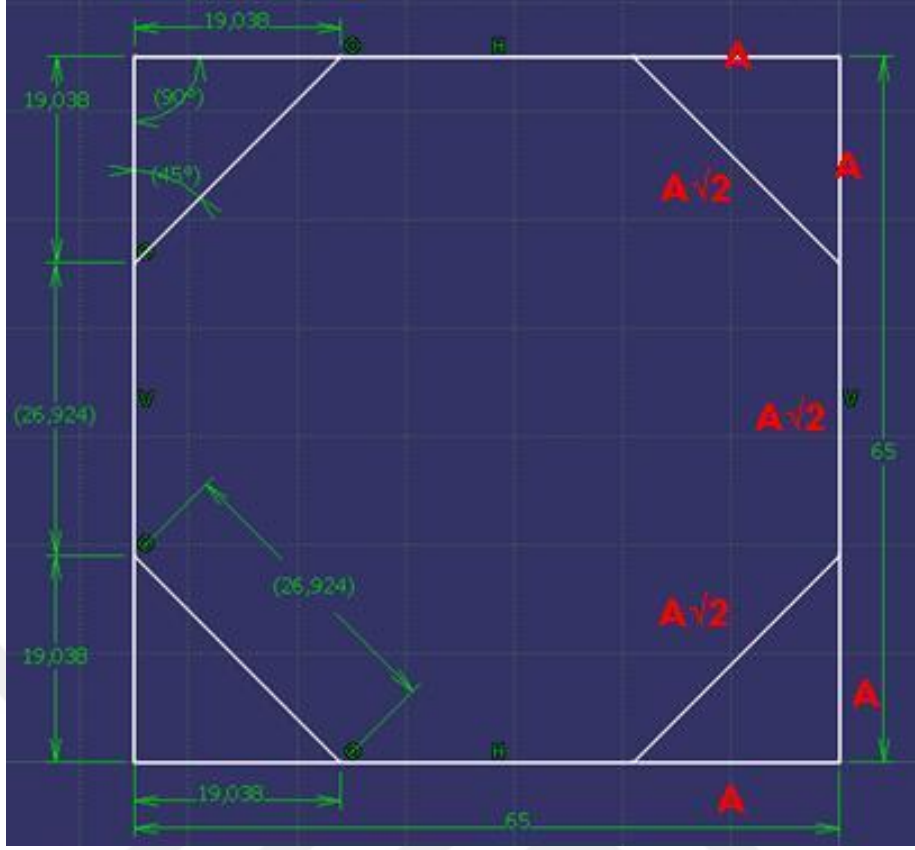


Şekil 2.2. Tomrukların biçilme şekli ve test örneklerinin elde edilmesi.

64 mm'lik küplerde 45° kesim yapılması sonucu oluşan her yüzeyin paralel yüzeyine olan mesafesinin aynı olması için Şekil 2.3'de görülen ikizkenar dik üçgen kenar uzunlukları bağıntısı kullanılmıştır. Bu bağıntı yardımı ile tahribatsız test örneğinin kenar uzunluğu denklem (2.1) ile hesaplanmıştır.

$$L = 2A + A \sqrt{2} \quad (2.1)$$

Burada; L küp kenar uzunluğunu (mm), A ikizkenar dik üçgenin dik kenar uzunluğunu (mm) ve $A\sqrt{2}$ ikizkenar dik üçgenin hipotenüs uzunluğunu (mm) ifade etmektedir.



Şekil 2.3. 65mm'lik küplerin polihedral geometriye dönüşümünün kenar bağıntısı.



Şekil 2.4. 26 yüzeyli tahribatsız test örneğinin hazırlanma aşamaları.

2.2.1.2. Tahribatlı Test Örneklerinin Hazırlanması

Temel akslara 45° açılı $20 \times 20 \times 60$ mm ölçülerindeki LR, LT ve RT basma örnekleri, Şekil 2.2 D ile gösterilen kısımdan Şekil 2.5'deki gibi kesilerek elde edilmiştir.



Şekil 2.5. Eksen dışı basma örneğinin hazırlanışı.

Şekil 2.6'da görülen LR, LT ve RT yönlerindeki eksen dışı basma örnekleri, 4000d/dk hızla dönen Lazzari tema 1500is daire testere makinesine bağlı dış çapı, kalınlığı ve diş sayısı sırası ile 300mm, 3,2mm ve 60 olan karbit dişli daire testere ile kesilmiştir.



Şekil 2.6. LR, LT ve RT eksen dışı basma örneklerinin üç kesitinin görünüşü.

2.2.2. Örneklerin Kondisyonlanması

Kurtoğlu ve Sofuoğlu [415] ağaç malzemenin rutubet miktarını, iç mekanın kaloriferli veya soba ile ısıtılması durumunda sırasıyla %8-10 ve %10-12, dış mekanda ise %12-16 olarak belirtmiştir. Kurtoğlu [46] iç mekanda kullanılan ve dış hava koşullarında kullanılan malzemelerde rutubet miktarının sırası ile %5-15 arasında ve %15'in üstünde

olduğunu belirtmiştir. Dolayısı ile tüm örneklerin, $20\pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %45, 65, 75 ve 85 bağıl nem koşullarında kondisyonlanarak sırası ile yaklaşık %8,5, 12, 14,4 ve 18 rutubet içeriğine sahip olması hedeflenmiştir.

Hava kurusu tüm örnekler, Memmert HCP 108 (Mettler GmbH+Co. KG, Schwabach, Germany) iklimlendirme kabiniinde $20\pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %45, 65, 75 ve 85 bağıl nem koşullarında değişmez ağırlığa gelinceye kadar kondisyonlanmıştır. Her bir bağıl nem grubunun kondisyonlama süresi yaklaşık 6-8 hafta sürmüştür.

2.2.3. Örnek Yoğunluklarının Belirlenmesi

İklimlendirme sonrası örnek yoğunlukları, TS2472 [13] standardına göre belirlenmiştir. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere hacim ve ağırlık ölçümüne dayalı stereo-metrik yöntem kullanılarak örneklerin yoğunlukları belirlenmiştir. Örnek yoğunlukları, %45, 65, 75 ve 85RH’deki iklimlendirme sonrasında denklem (2.2) ile hesaplanmıştır.



Şekil 2.7. Tahribatsız test örneklerinin ağırlık ve hacim ölçümü.

$$\delta_r = m_r / V_r \text{ (gr/cm}^3\text{)} \quad (2.2)$$

Burada; δ_r örnek yoğunluğunu (gr/cm^3), m_r örnek ağırlığını (gr) ve V_r örnek hacmini (cm^3) ifade etmektedir.

2.2.4. Rutubet Tayini

Deney örneklerinin rutubet içeriği, TS2471 [14] standardına göre kurutma metodu ile belirlenmiştir. Deney örnekleri, farklı değerlerde kondisyonlandıktan sonrası değişmez ağırlığa geldiklerinde test öncesi ağırlıkları ölçülmüştür. Örnekler, test sonrası $103\pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki kurutma kabiniinde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Örnekler, fırından alınarak hemen tartılmış ve denklem (2.3)’e göre rutubet içerikleri

hesaplanmıştır. Örneklerin ortamdan rutubet alış verişini önlemek için desikatör kullanılmıştır.

$$DRM = [(M_r - M_0) / M_0] * 100 (\%) \quad (2.3)$$

Burada; DRM (%) denge rutubeti miktarını, M_r (gr) iklimlendirme ile ulaşılan ve sabit rutubetli ağırlığı ve M_0 (gr) tam kuru ağırlığı ifade eder.

2.2.5. Kesme Modülünün Belirlenmesi

Ağaç malzeme kesme modüllerinin belirlenmesinde tahribatsız ve tahribatlı yöntemler kullanılmış ve elde edilen verilerin birbiri ile uyuşup uyuşmadığı belirlenmiştir. Tahribatsız yöntem, ultrasonik dalga yayılımı ile gerçekleştirilmişken tahribatlı yöntem eksen dışı basma testi ile gerçekleştirilmiştir.

2.2.5.1. Tahribatsız (Dinamik) Muayene – Ultrasonik Test

Denklem (2.4)'de görülen rijitlik matrisi ($[C]$), ses hızı ölçümü temelinde *Christoffel* eşitliği kullanılarak elde edilmektedir [105]. Denklem (2.5)'de görülen uyum matrisi ($[S]$) ise rijitlik matrisinin tersi alınarak ($[C]^{-1}$) elde edilir [143].

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Burada; C_{ii} 'ler matrisin diyagonal terimlerini ifade ederken C_{ij} 'ler de diyagonal olmayan terimlerini ifade etmektedir.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Burada; E_1, E_2 ve E_3 sırasıyla L, R ve T yönündeki Young's modülünü, G_{23}, G_{13} ve G_{12} sırasıyla RT, LT ve LR düzlemlerindeki kesme modülünü ve $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, \nu_{21}, \nu_{31}$ ve ν_{32} sırasıyla LR, LT, RT, RL, TL ve TR Poisson oranlarını ifade etmektedir.

Elastikiyet matrisi, ağaç malzemenin elastik davranışını belirleyen 12 parametrenin; elastikiyet (Young's) modülü (E_L , E_R , E_T), kesme modülü (G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}) ve poisson oranı (ν_{LR} , ν_{RL} , ν_{RT} , ν_{TR} , ν_{LT} ve ν_{TL}) elde edilmesinde kullanılabilir. Matrisin diyagonal terimlerinden E_L , E_R ve E_T sırasıyla denklem (2.6), (2.7) ve (2.8) ve G_{RT} , G_{LT} ve G_{RL} sırası ile denklem (2.9), (2.10) ve (2.11) ile hesaplanabilmektedir. Matrislerin diyagonal olmayan terimleri ya da diğer adıyla Poisson oranları ν_{LR} , ν_{LT} , ν_{RT} , ν_{RL} , ν_{TL} ve ν_{TR} ise denklem (2.12) - (2.14) ile hesaplanabilmektedir.

$$C_{11} = C_{LL} = \rho V_{LL}^2 10^6 \quad (2.6)$$

$$C_{22} = C_{RR} = \rho V_{RR}^2 10^6 \quad (2.7)$$

$$C_{33} = C_{TT} = \rho V_{TT}^2 10^6 \quad (2.8)$$

$$C_{44} = C_{RT} = \rho ((V_{RT} + V_{TR}) / 2)^2 10^6 \quad (2.9)$$

$$C_{55} = C_{LT} = \rho ((V_{LT} + V_{TL}) / 2)^2 10^6 \quad (2.10)$$

$$C_{66} = C_{RL} = \rho ((V_{RL} + V_{LR}) / 2)^2 10^6 \quad (2.11)$$

$$(C_{12} + C_{66}) n_1 n_2 = \sqrt{(C_{11} n_1^2 + C_{66} n_2^2 - \rho V_\alpha^2 10^6)(C_{66} n_1^2 + C_{22} n_2^2 - \rho V_\alpha^2 10^6)} \quad (2.12)$$

$$(C_{13} + C_{55}) n_1 n_2 = \sqrt{(C_{11} n_1^2 + C_{55} n_2^2 - \rho V_\alpha^2 10^6)(C_{55} n_1^2 + C_{33} n_2^2 - \rho V_\alpha^2 10^6)} \quad (2.13)$$

$$(C_{23} + C_{44}) n_1 n_2 = \sqrt{(C_{22} n_1^2 + C_{44} n_2^2 - \rho V_\alpha^2 10^6)(C_{44} n_1^2 + C_{33} n_2^2 - \rho V_\alpha^2 10^6)} \quad (2.14)$$

Burada ρ (kg/m^3) ağaç yoğunluğunu, V_{ij} (m/sn) *Christoffel* tensor ile ölçülen hızları, V_α (m/sn) α yönündeki dalga hızını ifade etmektedir.

On iki, on üç ve on dördüncü eşitlikteki $n_1 = \cos \alpha$ ve $n_2 = \sin \alpha$ 'dır. Bu çalışmadaki tahribatsız test örneği için tüm alfa değerleri 45° 'dir.

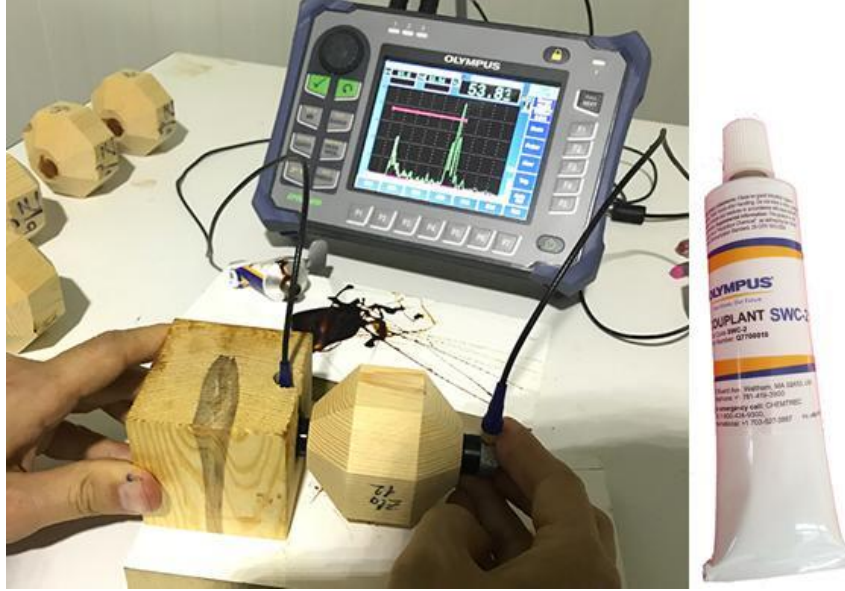
Kesme modülü belirlenmesinde kullanılan (2.9) - (2.11) denklemlerindeki V_{RT} , V_{TR} , V_{LT} , V_{TL} , V_{RL} ve V_{LR} ile ifade edilen ses hızlarının hesaplanabilmesi için 1MHz frekanslı enine dalga yayılımı yapan 13mm element boyutu olan Panametrics-NDT V153 (Olympus, USA) kesme dalga transdüseri kullanılmıştır.



Şekil 2.8. Kesme dalgası transdüseri (a) ve EPOCH 650 Ultrasonik hata dedektörü (b).

Transdüserlerle gönderilen ve alınan sinyallerin iletim ya da uçuş süresi (TOF-Time of Flight) değerleri ve dalga grafikleri Şekil 2.8’de görülen Olympus EPOCH 650 (Olympus, USA) ultrasonik hata dedektörü (EN12668-1 [15]) ile elde edilmiştir. Dalga iletim ya da uçuş süresi ve transdüserler arası mesafeden yola çıkarak hız verileri hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan transdüserlerin birbirleri ile olan polarizasyonları, sinyal alış verişi açısından çok önemlidir. Zira birbirleri ile olan polarizasyonlarında meydana gelen açısal farklılık, sinyal okumada zorlanma ya da hatalı uçuş zamanı elde etmeye neden olur. Bu neden ile ölçümler, Şekil 2.9’da görülen kalıp yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Şekildeki 26 yüzeyi olan test örneği ile L, R ve T eksenlerine ek olarak bu yönlere 45° açısı olan eksenlerde de ultrases ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Matrislerdeki tüm terimler, bu geometriye sahip tek bir örnek ile belirlenebilmektedir [242]. Malzeme ile transdüserin temasını kusursuz hale getirerek ölçümlerde gürültü seviyesini en aza indirmek, hassas bir ölçüm yapabilmek için Olympus Shear Wave Couplant (SWC) (Chemtrec, MA, USA) kesme dalgası temas maddesi kullanılmıştır. Çok yüksek viskoziteli kesme dalgası temas maddesi ya da tutkallar, bazı durumlarda kesme dalgasının malzemeye iletilmesini engelleyebilmekte ve kesme testini olumsuz etkileyebilmektedir [416]. Burada kullanılan SWC jel OLYMPUS’un test konfigürasyonu için uygun gördüğü özelliklerdedir.



Şekil 2.9. SWC jel kullanılarak gerçekleştirilen ultrasonik ölçüm.

Olympus [417] ultrasonic transducers technical notes'a göre kesme modülü hesabı aşağıdaki denklem (2.15) ile de belirlenebilmektedir.

$$G = V_T^2 \rho \quad (2.15)$$

Burada; G kesme modülünü (N/mm^2), V_T kesme dalgası hızını (m/sn) ve ρ malzeme yoğunluğunu (g/cm^3) ifade etmektedir.

2.2.5.2. Tahribatlı Muayene - Statik Test

Dinamik yöntemle elde edilen verilerin gerçek değerler ile karşılaştırılması için çalışmanın ikinci aşamasında statik test gerçekleştirilmiştir. Statik test olarak eksen dışı (45°) basma testi Şekil 2.10'da görüldüğü gibi uygulanmıştır.



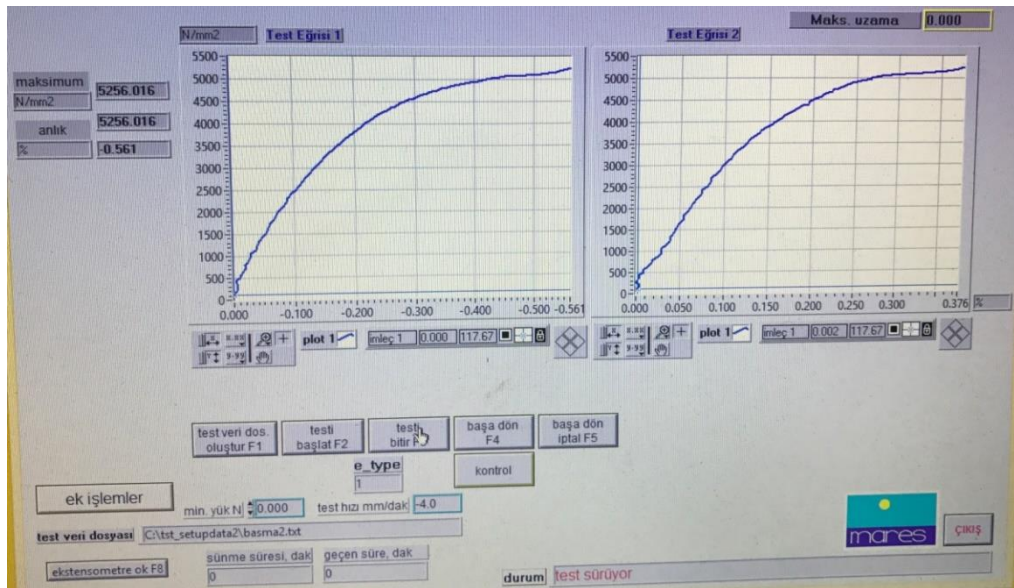
Şekil 2.10. Kızılcam 45° eksen dışı basma testi örneği.

Basma testi, üniversal test cihazı ve ona bağlı 5 tonluk yük hücresi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.11. Epsilon marka bi-aksiyal ekstensometre.

Basma testi esnasında örneklerde meydana gelen gerilme-şekil değiştirme verileri, Şekil 2.10'da görülen 25mm gauge uzunluğuna sahip ve anizotropik malzemelerin testi için ideal olan Epsilon 3560 bi-aksiyal ekstensometre (Epsilon, WY, USA) ve bunun bağlı olduğu Şekil 2.11'de görülen iki kanallı dijital şekil değişimi ölçüm cihazı Epsilon DSM-Plus (Epsilon, WY, USA) kullanılarak Şekil 2.12'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 2.12. Ekstensometreden alınan yatay ve dikey gerilme-şekil değiştirme verileri.

Statik kesme modülleri, elde edilen gerilme şekil değiştirme verilerinin Aira vd. [173] tarafından belirtilen denklem (2.16)'da kullanılması ile hesaplanmıştır. Statik kesme

modülü hesabında, gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin elastik bölge sınırları içerisindeki doğrusal özellik gösteren gerilme ve şekil değiştirme verileri kullanılmıştır.

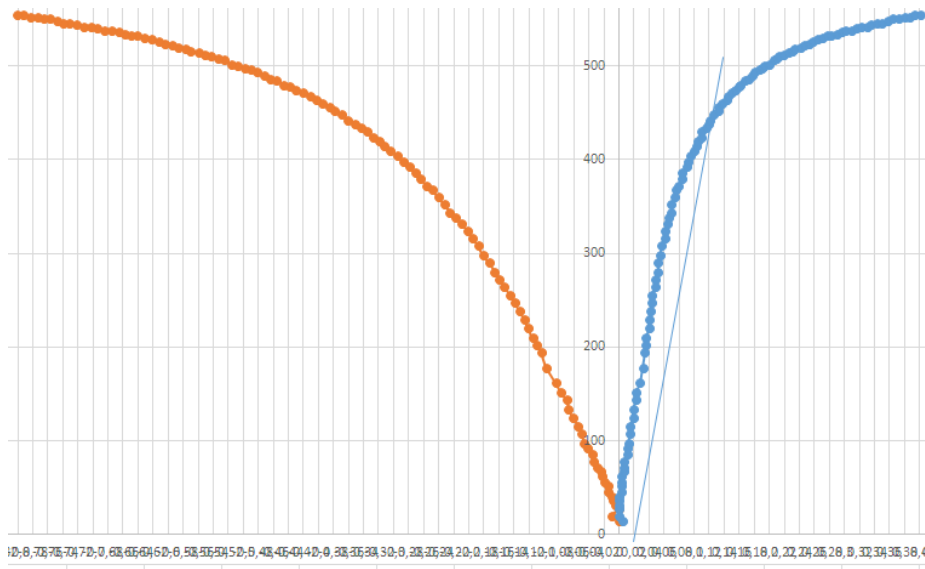
$$G_{xy} = \frac{\sigma_{y'}}{2(\varepsilon_{x'} - \varepsilon_{y'})} \quad (2.16)$$

Burada; G_{xy} xy düzlemindeki kesme modülünü (N/mm²), $\sigma_{y'}$ ortalama yatay gerilmeyi (N), $\varepsilon_{x'}$ ortalama dikey şekil değiştirmeyi (mm) ve $\varepsilon_{y'}$ ortalama yatay şekil değiştirmeyi (mm) ifade etmektedir.

2.2.6. Kesme Gerilme Sınırının Belirlenmesi

Akma sınırı ya da mukavemeti %0.2 plastik şekil değiştirmeye neden olan gerilme durumunu ve plastik bölgenin ya da deformasyonun başlangıcını ifade eder. Akma sınırını tayin edebilmek için gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki şekil değiştirme ekseninin %0.2 noktası belirlenir ve bu noktadan eğrinin doğrusal kısmına paralel bir çizgi çizilir. Bu çizginin eğriyi kestiği noktadaki gerilme değeri, akma sınırını belirler [18].

Kesmede akma gerilmesinin başladığı nokta, Şekil 2.13'de görüldüğü üzere statik basma testleriyle elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin elastik bölgedeki doğrusal rotasının %0,2 ofsetlenmesi ile belirlenmiştir. Bu noktadaki gerilmenin Newton cinsinden yük değeri hesaplanmış ve örneğin enine kesit alanına (mm²) bölünerek kesme gerilmesi sınırı hesaplanmıştır.



Şekil 2.13. Sarıçam LT basma örneğinin kesmede akma noktasının belirlenmesi.

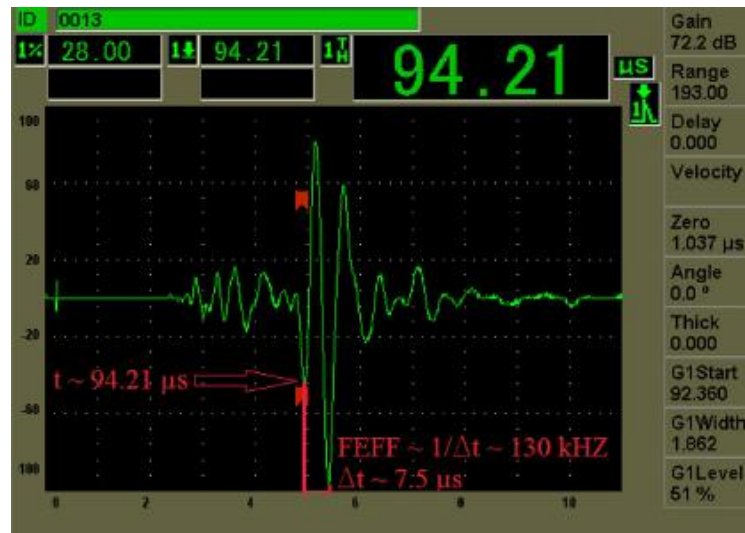
Akmanın başladığı ve bittiği noktalardaki gerilmelere üst akma ve alt akma sınırı denir [18]. Bu çalışmada akmanın başladığı elastik bölgedeki kesme gerilme sınırı (shear stress limit) belirlenmiştir.

2.2.7. Efektif Frekans

Transdüserin yayılım yaptığı nominal frekans, malzeme özelliklerine bağlı olarak yayılım süresince zayıflayabilir. Odundaki sinyal zayıflaması, odunun ortotropik özelliği nedeni ile her üç yönde farklılık göstermektedir. Test edilen örnek boyutunun da sinyal zayıflaması üzerinde önemli etkisi vardır zira ne kadar uzun örnek boyutu o kadar fazla sinyal zayıflaması demektir. Dolayısı ile bu çalışmada kullanılan kesme dalgasının nominal 1MHz frekansı, malzeme özelliği ve ölçüsüne bağlı olarak L, R ve T yönlerinde zayıflamıştır. Zayıflama sonucu ortaya çıkan bu frekans, efektif frekans (EF) olarak adlandırılmaktadır. Kızılcım, karaçam ve sarıçam test örneklerinin LR, LT ve RT düzlemlerindeki EF değerleri, denklem (2.17) ile hesaplanmıştır.

$$EF = 1 / \Delta t \quad (2.17)$$

Burada; EF efektif frekans (kHz) ve Δt Şekil 2.14'de görüldüğü üzere iki pik arasındaki zaman farkını (μs) ifade etmektedir.



Şekil 2.14. Efektif frekansın belirlenmesi [143].

2.2.8. Dalga Boyu

Dalga boyu, bir dalga örüntüsünün tekrarlanan pozitif ya da negatif alternansları üzerindeki pikleri ya da noktaları arasındaki mesafedir ve lambda (λ) ile gösterilir.

Malzemedeki dalga yayılımı birçok parametreden etkilenir. Dalgaboyu (λ) da bunlardan biridir ve Bucur [105], Trinca ve Goncalves [418] ve Kohlhauser ve Hellmich [240]'e göre transdüserler arasındaki mesafe dalga boyundan daha büyük olmalıdır. Buna göre $3-5\lambda$ arası değerlerin ultrasonik testler için iyi olduğu belirtilmiştir [105], [418], [419].

Ultrasonik dalga hızı odunun L, R ve T yönlerine bağlı olarak farklılık gösterir. Dalga boyu, dalganın malzemedeki yayılım hızı ve dalga frekansı ile ilişkilidir ve denklem (2.18) ile hesaplanır.

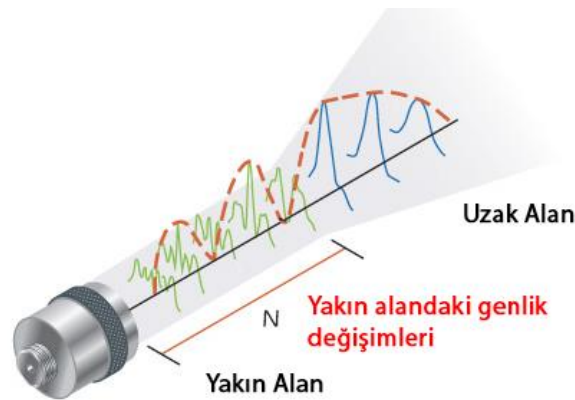
$$\lambda = v / f \quad (2.18)$$

Burada; λ dalga boyu (mm), v dalga yayılım hızı (km/s) ve f dalga frekansdır (MHz).

Bu çalışmada kullanılan transdüserlerin nominal frekansı 1MHz olsa da dalga boyu hesabında, Vazquez vd. [143]'nde belirtildiği üzere efektif frekanslar kullanılmıştır.

2.2.9. Yakın Alan

Transdüserlerin ses alanları yakın ve uzak alan olmak üzere ikiye ayrılır. Yakın alan, ses basıncının maksimum ve minimum seriler halinde ilerlediği transdüserle yakın olan alanı ifade eder ve Şekil 2.15'de görülen maksimum pikin olduğu yerde son bulur. N ile gösterilen bu alan, transdüserin doğal odak alanını ifade eder. Ses basıncı, bu alandan sonra kademeli olarak sıfıra düşer ve ses basıncının enerjisi yok olur. Yakın alan mesafesi, transdüser frekansı ve çapı ve test edilen malzemedeki ses hızının bir fonksiyonudur. Yakın alanda meydana gelen ses basıncı değişimlerinden dolayı genlik temelli tekniklerin kullanımı ile kusurların tam olarak değerlendirilebilmesi güçtür. Ayrıca N , transdüser hızının akustik lens ya da faz tekniği yoluyla odaklanabileceği en fazla mesafeyi ifade etmektedir [420].



Şekil 2.15. Yakın alan ve uzak alan yayılımı [420].

Bu çalışmada kullanılan 13mm'lik çapa sahip transdüserlerin yakın alanı, denklem (2.19) kullanılarak hesaplanmıştır. Fakat dairesel olmayan transdüserlerin yakın alan hesabı denklem (2.20) kullanılarak gerçekleştirilir.

$$NF = \phi^2 / 4\lambda \quad (2.19)$$

$$NF = kL^2f / 4c = kL^2 / 4\lambda \quad (2.20)$$

Burada; NF (Near Field) yakın alanı, ϕ ölçümlerde kullanılan transdüserin çapını (mm) ve λ ölçümlerde kullanılan 1MHz frekanslı ultrasonik dalganın dalga boyunu (mm), k boy-en oranını, L element boyunu, f frekansı ve c test edilen malzemedeki ses hızını ifade etmektedir.

Ultrasonik hüzmeye, uzak alanda çok daha uniformdur. Ses dalgaları, uzak alanda daha iyi davranış sergiler ve genlik olarak Şekil 2.15'de görüldüğü üzere en yüksek genlik değerine ulaşır. Dolayısı ile malzeme içerisindeki kusurlar bu alanda ise optimum tespit sonuçları elde edilebilir [421].

2.2.10. Yayılım Uzunluğu İle Dalga Boyu Arasındaki İlişki

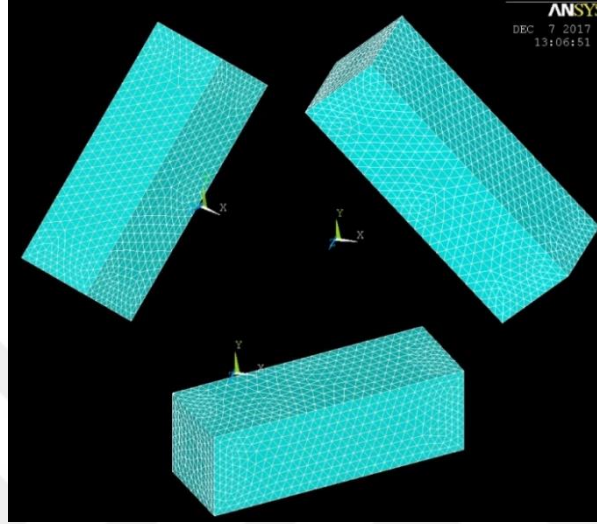
Yayılım uzunluğu, ultrasonik dalga hüzmelerinin aldığı mesafeyi ifade eder. Bu çalışmada ultrasonik ölçümler için transdüserlerin karşılıklı konumlandırıldığı örnek yüzeyleri arasındaki mesafe 64mm'dir. Dolayısı ile nominal yayılım uzunluğu (L) örnek geometrisi dikkate alındığında tüm doğrultular için 64mm'dir. Yayılım uzunluğu ile dalga boyu arasındaki ilişki L/λ bağıntısı ile hesaplanmıştır.

2.2.11. Sonlu Elemanlar Analizi

Statik testlerle elde edilen yük-deformasyon verileri, gerilme-şekil değiştirme verilerine dönüştürülmüştür. Kesme modülleri, gerilme şekil-değiştirme verilerinin lineer elastik bölgesinden hesaplandığı için gerilme-şekil verilerinin de lineer elastik bölgedeki davranışı analiz edilmiştir. Dolayısı ile 45° eksen dışı basma örnekleri, ANSYS v10 yazılımı kullanılarak lineer elastik ortotropik malzeme özellikleri ile Şekil 2.16'da görüldüğü üzere 20x20x60mm ölçülerinde LR(XY)45, LT(XZ)45 ve RT(YZ)45 olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Modelleme, aktif koordinat sisteminde keypoints'ler oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Keypoints'ler düz çizgiler ile birleştirilmiş ve sonrasında alan tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede oluşturulan 2B'li alan operate, extrude, areas, along normal sekmeleri takip edilerek 3B katı model haline getirilmiştir.

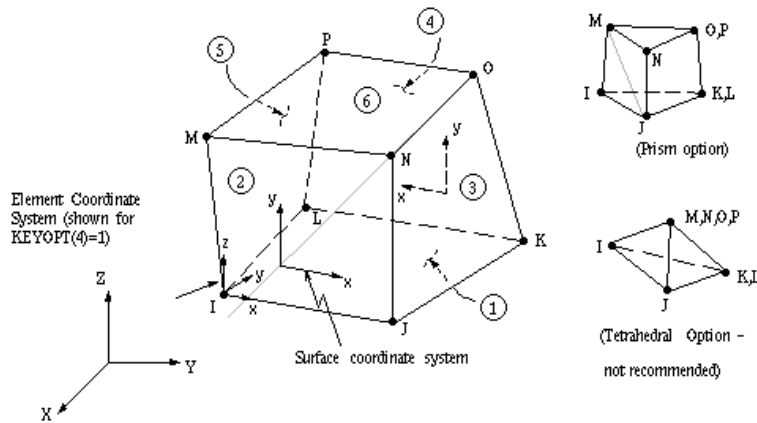
Her bir tür ve eksen dışı model için aynı yollar tekrar edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizi, sadece %65 bağıl nemdeki verilerin modellenmesi ile gerçekleştirilmiş ve %65 bağıl nemdeki statik test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Eksen dışı LR, LT ve RT basma modellemelerinden elde edilen verilerin daha iyi olmasını sağlamak için modellerin mesh seviyesi 3'e yükseltilmiştir.



Şekil 2.16. LR (XY) 45 (alt) , LT (XZ) 45 (sağ üst) ve RT (YZ) 45 (sol üst) eksen dışı basma örnek modelleri.

Modellemede, Şekil 2.17'de yapısal detayları görülen üç boyutlu Solid 45 yapısal katı elementi kullanılmıştır. Solid 45 elementi kullanılarak ANSYS'de modellenen basma örneklerinin lineer ortotropik analizinin yapılabilmesi için yoğunluk, Young's modülü (E_L , E_R ve E_T), Poisson oranı (ν_{LR} , ν_{RT} ve ν_{LT}) ve kesme modülü (G_{LR} , G_{RT} ve G_{LT}) değerleri girilmiştir. Girilen yoğunluk ve kesme modülü değerleri, bu çalışmada elde edilen veriler iken diğer değerler için literatürden yararlanılmıştır.



Şekil 2.17. Solid 45, üç boyutlu yapısal element [201].

Çizelge 2.5. Modellemede kullanılan malzeme parametreleri.

Parametre	Tür [Kaynak]		
	Kızılçam [422]	Karaçam [423]	Sarıçam [253]
E_L (N/mm ²)	9200	8534	15621
E_R (N/mm ²)	975	1386	804
E_T (N/mm ²)	672	444	532
ν_{LR} (-)	0.48	0.68	0.6
ν_{RT} (-)	0.66	0.64	0.69
ν_{LT} (-)	0.49	0.74	0.74

SEA çözümlesinde modelin bir enine kesiti (UX, UY ve UZ serbestlik dereceleri 0 olarak ayarlanarak) sabitlenmiştir. Zıt enine kesitten ise statik yöntemle belirlenen yük değerleri girilmiştir. Yükleme sonrasında modelde meydana gelen dikey ve yatay şekil değiştirme verileri, statik testlerdeki ekstensometrenin veri elde ettiği konumlar dikkate alınarak belirlenmiş ve gerilme-şekil değiştirme verileri elde edilmiştir. Sonrasında lineer elastik bölge davranışı, SEA verilerinin statik test verileri üzerine yerleştirilmesiyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2.2.12. Verilerin Değerlendirilmesi

Çalışma sonucunda elde edilen verilerin tasnif edilerek görselleştirilmesinde MS Office Excel, %95 güven düzeyinde istatistiksel analizler gerçekleştirilmesinde ise SPSS v20 programları kullanılmıştır. Tanımlayıcı istatistikler oluşturulup deneme desenine göre gruplar arası farkın önem kontrolü için varyans analizleri yapılmıştır. Varyans analizi sonuçlarına göre gruplar arası farkın önemli bulunduğu durumlarda bu farkın hangi grup ya da gruplardan kaynaklandığını belirlemek üzere çoklu karşılaştırma (Post-Hoc) testleri uygulanmıştır. Post-Hoc testlerin uygulanmasında varyansların homojenliği kontrol edilmiş ve uygun Post-Hoc testleri kullanılmıştır. Grup varyanslarının homojen olan örnek grupları için, güçlü bir Post-Hoc test olan DUNCAN çoklu aralık testi kullanılırken grup varyanslarının homojen olmadığı örnek grupları için Tamhane T2 testinin kullanılmasına karar verilmiştir. Elde edilen veriler tablo ve grafik olarak belirtilmiştir. Dinamik ve statik yöntemle elde edilen veriler ile rutubet değeri arasındaki ilişki, regresyon analizi ile belirlenerek ultrasonik yöntemin kesme modülünün belirlenmesinde etkili olabileceği ya da olamayacağı ortaya konulmuştur.

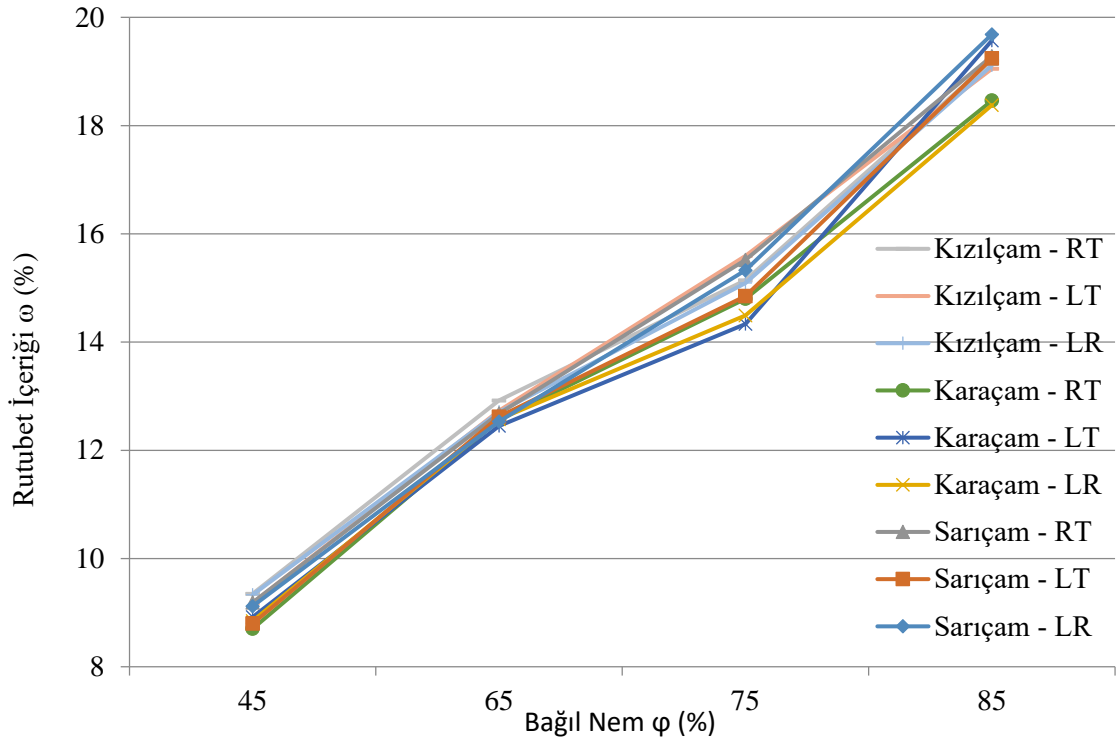
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Rutubet, odunun birçok özellikleri üzerine farklı etkilere neden olabilmektedir. Bu çalışmada, %45, %65, %75 ve %85 bağıl nem seviyelerinde iklimlendirilmiş kızılçam, sarıçam ve karaçam odunlarının rutubet içeriğinin bazı fiziksel ve mekanik özelliklere etkisinin bulguları ortaya konulmuş ve istatistiksel çözümlemesi yapılmıştır.

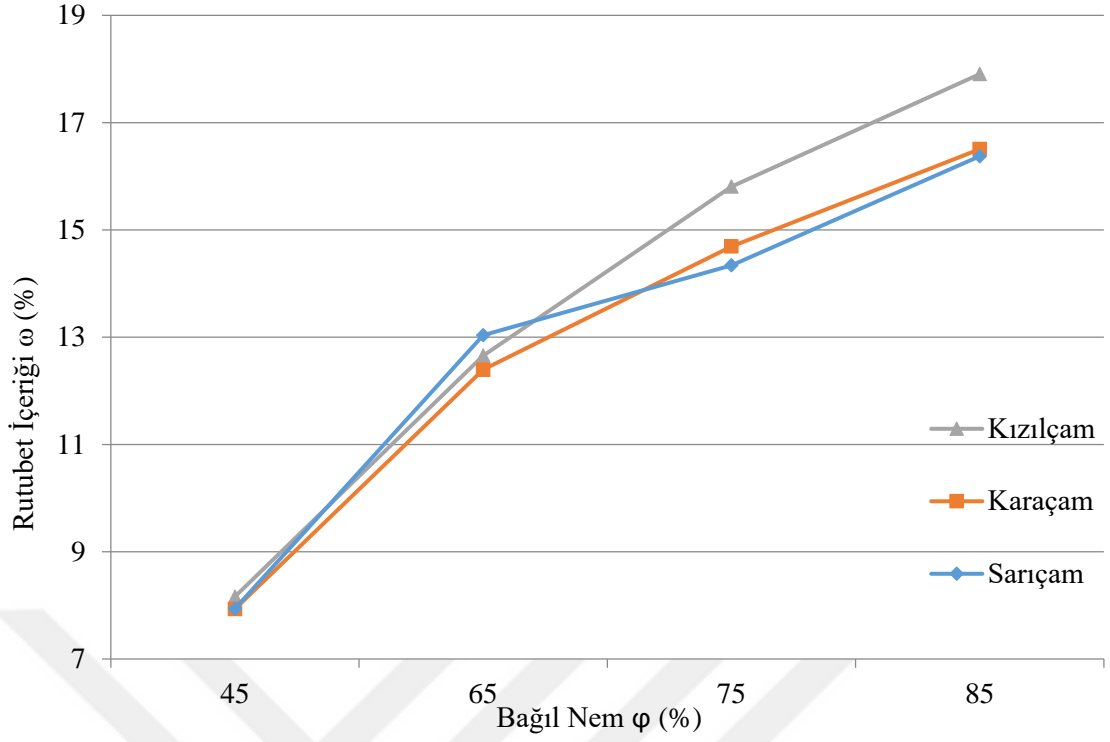
3.1. FİZİKSEL ÖZELLİKLER

Bu çalışmada %45, %65, %75 ve %85 bağıl nemde iklimlendirilmiş kızılçam, karaçam ve sarıçam odunlarının rutubet içeriği ve yoğunluğu çizelgelerdeki gibi belirlenmiş ve rutubetin elastik özelliklerinden biri olan kesme modülüne etkisi ortaya konulmuştur.

Yüzde 45, %65, %75 ve %85 bağıl nem seviyelerinde iklimlendirilmiş deney örneklerinin rutubet içeriğinin bağıl nem seviyeleri ile ilişkisi statik ve dinamik olarak sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre tüm test örneklerinin rutubet içeriği beklendiği gibi bağıl nem seviyesi artışı ile artmıştır.

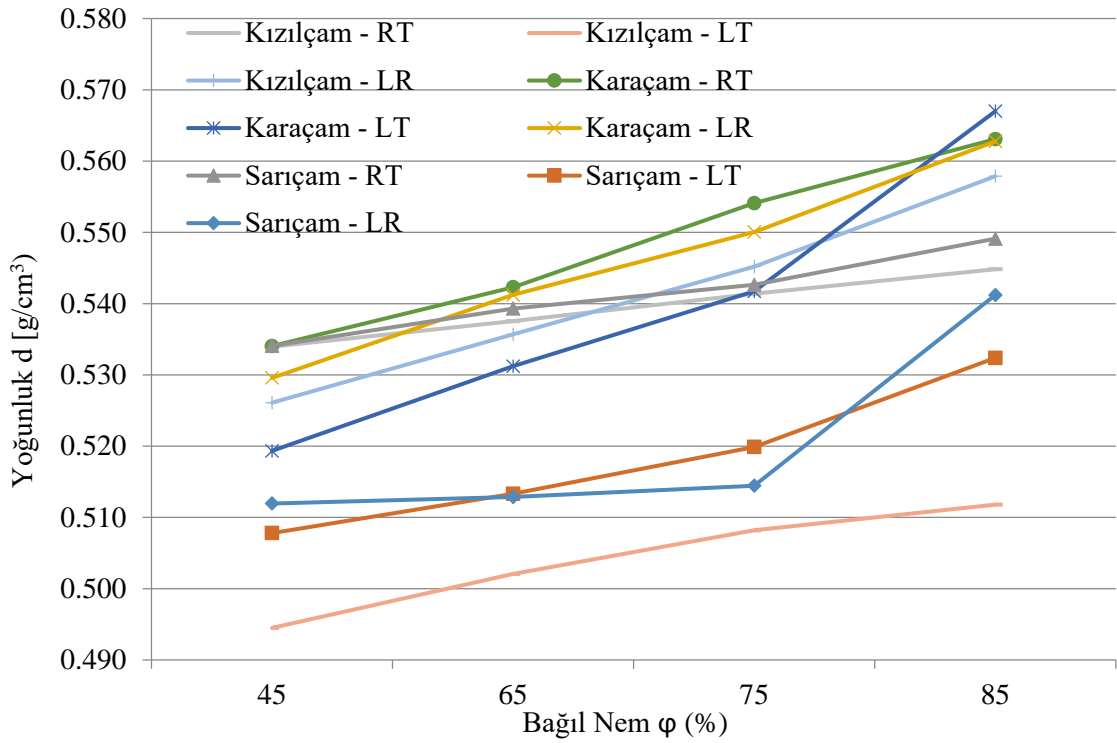


Şekil 3.1. Statik test örneklerinin bağıl nem ve rutubet içeriği arasındaki ilişki.

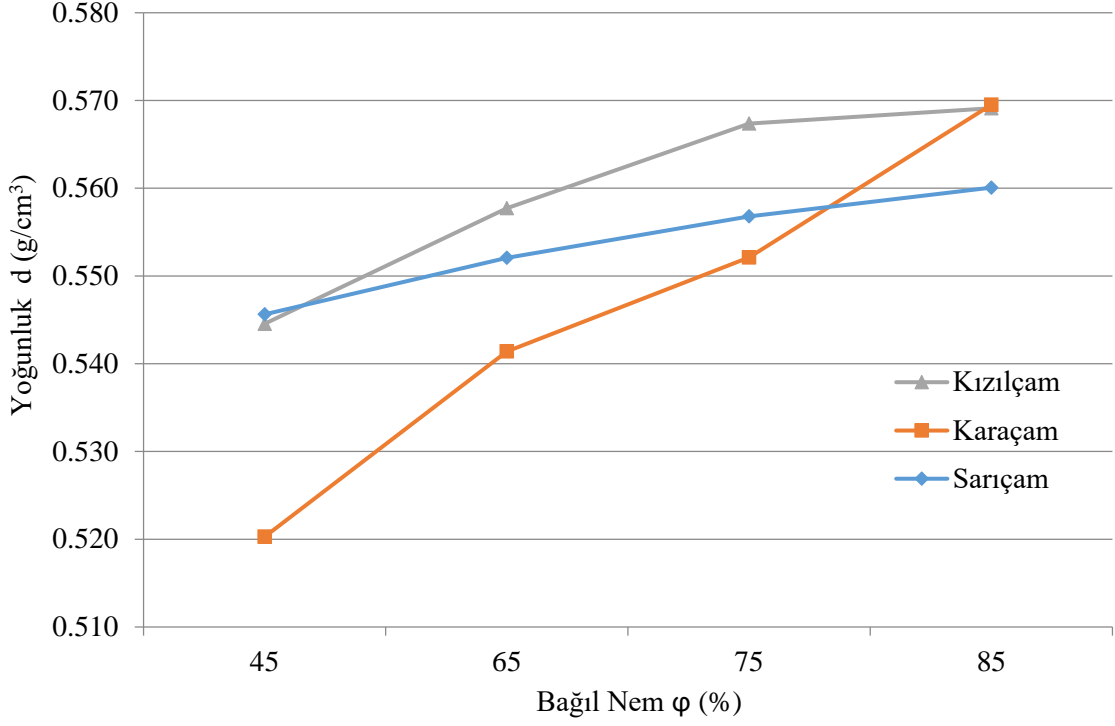


Şekil 3.2. Dinamik test örneklerinin bağıl nem ve rutubet içeriği arasındaki ilişkisi

Yüzde 45, 65, 75 ve 85% bağıl nem seviyelerinde iklimlendirilmiş deney örneklerinin yoğunluğunun bağıl nem seviyeleri ile ilişkisi statik ve dinamik olarak sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Statik test örneklerinin bağıl nem ve yoğunluğu arasındaki ilişki



Şekil 3.4. Dinamik test örneklerinin bağıl nem ve yoğunluğu arasındaki ilişki.

Tüm örneklerin yoğunlukları, beklendiği üzere bağıl nem artışı ile artmıştır. Bununla birlikte türlerin rutubet içeriği ve yoğunluk değerlerinin ortalamaları ve değerlerin varyasyon katsayıları ayrı ayrı olarak Çizelge 3.1'den Çizelge 3.4'e kadar gösterilmiştir.

Varyasyon ya da değişim katsayısı standart sapmanın aritmetik ortalamasının kaçta kaç olduğunu belirten bir istatistiksel yayılma ölçüsüdür. Çizelge 3.1'de görüldüğü üzere kızılçam odunu statik eksen dışı basma örneklerinin hem yoğunluk hem de rutubet içeriği değerlerindeki varyasyon katsayılarının düşük olması, değerlerde aşırı uçların olmadığı ve verilerin homojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 3.1. Kızılçam statik test örneklerinin fiziksel özelliklerine ait bulgular.

Tür	Yön	Bağlı Nem (%)	Örnek Sayısı	Ortalama (\bar{x}) Varyasyon Katsayısı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Rutubet İçeriği (%)
Kızılçam	RT	45	20	\bar{x}	0,534	9,35
				V[%]	4,26	1,11
		65	20	\bar{x}	0,538	12,92
				V[%]	2,22	1,46
		75	20	\bar{x}	0,541	15,14
				V[%]	4,2	4,1
85	20	\bar{x}	0,545	19,21		
		V[%]	5,93	0,95		
Kızılçam	LT	45	20	\bar{x}	0,495	9,18
				V[%]	2,68	1,55
		65	20	\bar{x}	0,502	12,73
				V[%]	2,21	2,12
		75	20	\bar{x}	0,508	15,59
				V[%]	2,39	1,39
85	20	\bar{x}	0,512	19,05		
		V[%]	2,65	0,98		
Kızılçam	LR	45	20	\bar{x}	0,526	9,33
				V[%]	1,89	1,08
		65	20	\bar{x}	0,536	12,71
				V[%]	2,64	1,96
		75	20	\bar{x}	0,545	15,09
				V[%]	2,02	1,43
85	20	\bar{x}	0,558	19,11		
		V[%]	2,78	1,12		

Çizelge 3.2’de görüldüğü üzere karaçam odunu statik eksen dışı basma örneklerinin hem yoğunluk hem de rutubet içeriği değerlerindeki varyasyon katsayılarının düşük olması, değerlerde aşırı uçların olmadığını ve verilerin homojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 3.2. Karaçam statik test örneklerinin fiziksel özelliklerine ait bulgular.

Tür	Yön	Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Ortalama (x) Varyasyon Katsayısı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Rutubet İçeriği (%)
Karaçam	RT	45	20	\bar{x}	0,534	8,7
				V[%]	2,01	1,02
		65	20	\bar{x}	0,542	12,56
				V[%]	3,08	2,4
		75	20	\bar{x}	0,554	14,8
				V[%]	1,73	1,48
85	20	\bar{x}	0,563	18,46		
		V[%]	3,01	1,61		
Karaçam	LT	45	20	\bar{x}	0,519	8,92
				V[%]	2,75	2,12
		65	20	\bar{x}	0,531	12,45
				V[%]	3,29	1,89
		75	20	\bar{x}	0,542	14,33
				V[%]	4,33	1,35
85	20	\bar{x}	0,567	19,57		
		V[%]	2,78	1,06		
Karaçam	LR	45	20	\bar{x}	0,530	8,85
				V[%]	2,55	0,76
		65	20	\bar{x}	0,541	12,57
				V[%]	3,63	1,46
		75	20	\bar{x}	0,550	14,49
				V[%]	2,3	0,91
85	20	\bar{x}	0,563	18,38		
		V[%]	2,59	1,34		

Çizelge 3.3’de görüldüğü üzere sarıçam odunu statik eksen dışı basma örneklerinin hem yoğunluk hem de rutubet içeriği değerlerindeki varyasyon katsayılarının düşük olması, değerlerde aşırı uçların olmadığı ve verilerin homojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 3.3. Sarıçam statik test örneklerinin fiziksel özelliklerine ait bulgular

Tür	Yön	Bağlı Nem (%)	Örnek Sayısı	Ortalama (\bar{x}) Varyasyon Katsayısı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Rutubet İçeriği (%)
Sarıçam	RT	45	20	\bar{x}	0,534	9,19
				V[%]	4,46	1,23
		65	20	\bar{x}	0,539	12,68
				V[%]	2,13	2,24
		75	20	\bar{x}	0,543	15,52
				V[%]	2,44	1,49
85	20	\bar{x}	0,549	19,28		
		V[%]	4,57	1,23		
Sarıçam	LT	45	20	\bar{x}	0,508	8,8
				V[%]	2,29	1,18
		65	20	\bar{x}	0,513	12,62
				V[%]	1,03	3,1
		75	20	\bar{x}	0,520	14,85
				V[%]	2,06	0,78
85	20	\bar{x}	0,532	19,24		
		V[%]	2,22	3,03		
Sarıçam	LR	45	20	\bar{x}	0,512	9,12
				V[%]	6,96	1,78
		65	20	\bar{x}	0,513	12,53
				V[%]	3,71	2,25
		75	20	\bar{x}	0,514	15,33
				V[%]	6,97	1,92
85	20	\bar{x}	0,541	19,69		
		V[%]	7,51	2,4		

Dinamik test örnekleri, LR, LT ve RT düzlemlerindeki ölçümleri tek bir örnek üzerinden yapabilmeye fırsat tanıdığı için Çizelge 3.4’de bu yönler belirtilmemiştir zira bu örnekler L, R ve T doğrultularının dışında 45° eksen dışı yönleri de kapsamaktadır. Statik test örneklerinde olduğu gibi dinamik test örneklerinin de fiziksel özelliklerindeki varyasyon katsayıları çok düşüktür ve veriler homojen yayılmıştır.

Çizelge 3.4. Dinamik test örneklerinin fiziksel özelliklerine ait bulgular

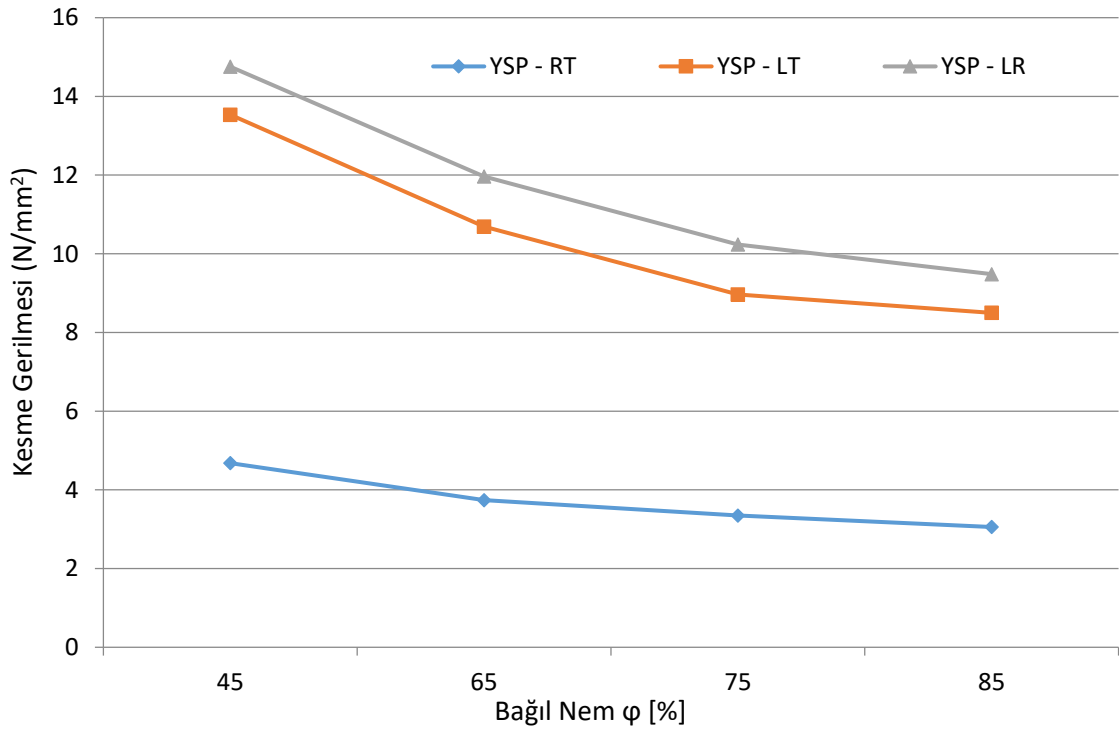
Tür	Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Ortalama (x) Varyasyon Katsayısı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Rutubet İçeriği (%)
Kızılçam	45	20	\bar{x}	0,545	8,16
			V[%]	1,23	3,32
	65	20	\bar{x}	0,558	12,66
			V[%]	1,33	3,21
	75	20	\bar{x}	0,567	15,81
			V[%]	0,74	1,42
	85	20	\bar{x}	0,569	17,91
			V[%]	4,4	1,57
Karaçam	45	20	\bar{x}	0,520	7,93
			V[%]	5,41	0,75
	65	20	\bar{x}	0,541	12,4
			V[%]	2,53	3,89
	75	20	\bar{x}	0,552	14,69
			V[%]	1,65	3,41
	85	20	\bar{x}	0,570	16,51
			V[%]	2,01	1,62
Sarıçam	45	20	\bar{x}	0,546	7,94
			V[%]	6,92	1,75
	65	20	\bar{x}	0,552	13,04
			V[%]	1,6	1,98
	75	20	\bar{x}	0,557	14,34
			V[%]	1,12	3,73
	85	20	\bar{x}	0,560	16,37
			V[%]	2,41	1,99

Aziz vd. [116] odunun elastik özelliklerinin, rutubet içeriği ve yoğunluğa bağlı olarak değiştiğini, yüksek yoğunluklarda odunun statik ve dinamik test sonuçlarının iyi olduğunu belirtmiştir. Araştırmacılar, ultrasonik dalga hızı ile tropikal odun yoğunluğu arasında nispeten doğrusal olmayan bir ilişki belirlemiştir.

Bu çalışmada test edilen örneklerin rutubet içeriği ve yoğunluk değerlerinin araştırılan özelliklere etkisi sonraki başlıklarda ortaya konulmuştur.

3.2. KESME GERİLME SINIRI

Kesme gerilme sınırı, statik testlerden elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrilerinin doğrusal bölgelerinde oluşturduğu düz çizginin %0,2 ofsetlenmesi sonucu çizginin eğriye temas ettiği noktadaki gerilme verilerinin yük verilerine dönüştürülmesi ve örnek kesit alanına oranlanması ile elde edilmiştir. Kızılçam, karaçam ve sarıçam test örneklerinin LR, LT ve RT yönlerindeki kesme gerilme sınırının bağıl neme bağlı olarak değişimleri sırasıyla Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Kızılçam kesmede gerilme sınırının bağıl neme göre değişimi.

Kızılçam odunu eksen dışı statik test örneklerinin tüm düzlemlerdeki kesme gerilme sınırları, Şekil 3.5’de görüldüğü üzere rutubet içeriği artışı ile düşmüştür.

Çizelge 3.5’deki varyans analizi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme gerilme sınırlarında meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P<0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.5. Kızılçam statik LR kesme gerilme sınırı varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	328,960a	3	109,653	53,797	,000
Intercept	10782,207	1	10782,207	5289,851	,000
RH	328,960	3	109,653	53,797	,000
Error	154,909	76	2,038		
Total	11266,077	80			
Corrected Total	483,870	79			
a. R Squared = ,680 (Adjusted R Squared = ,667)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme gerilme sınırları için, Çizelge 3.6’da görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %75 ve 85 bağıl nemdeki kesme gerilmeleri aynı grupta yer almıştır.

Çizelge 3.6. Kızılçam statik LR kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	9,4810		
75	20	10,2355		
65	20		11,9645	
45	20			14,7565
Sig.		,099	1,000	1,000

Çizelge 3.7’deki varyans analizi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırlarında bağıl nem düzeyine bağlı olarak meydana gelen düşmenin anlamlı olduğu ($P<0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.7. Kızılçam statik LT kesme gerilme sınırı varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	311,355a	3	103,785	79,285	,000
Intercept	8687,779	1	8687,779	6636,874	,000
RH	311,355	3	103,785	79,285	,000
Error	99,485	76	1,309		
Total	9098,619	80			
Corrected Total	410,840	79			
a. R Squared = ,758 (Adjusted R Squared = ,748)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırları için, Çizelge 3.8’de görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %75 ve 85 bağıl nemdeki kesme gerilmeleri, aynı grupta yer almıştır.

Çizelge 3.8. Kızılçam statik LT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	8,4995		
75	20	8,9640		
65	20		10,6880	
45	20			13,5325
Sig.		,203	1,000	1,000

Çizelge 3.9'daki varyans analizi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırlarında meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

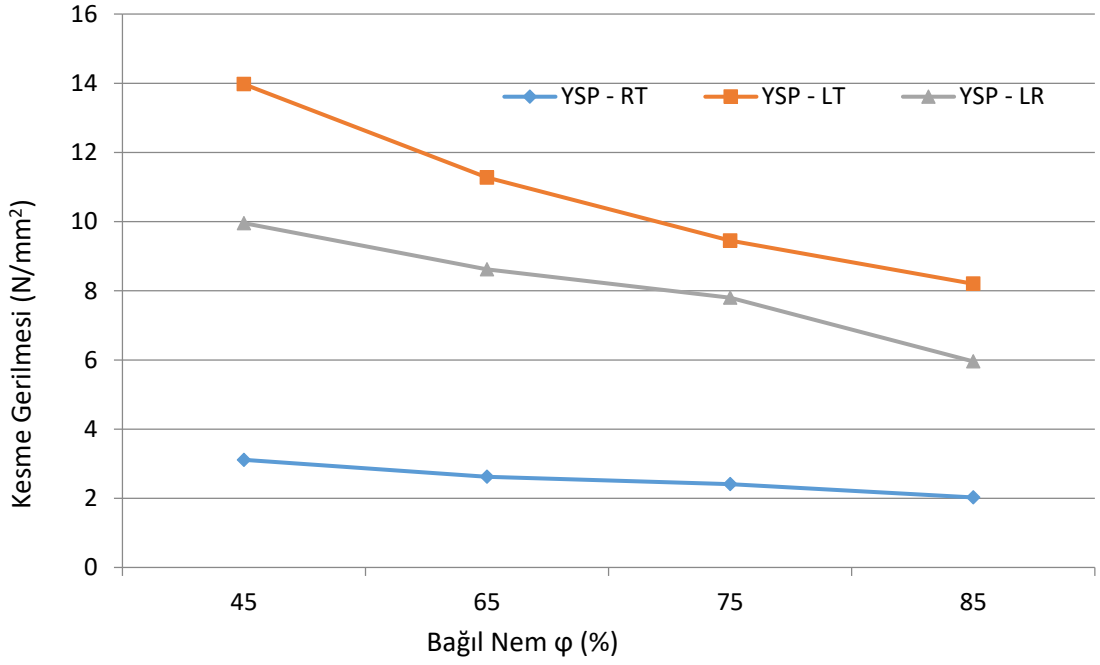
Çizelge 3.9. Kızılçam statik RT kesme gerilme sınırı varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	30,022a	3	10,007	65,926	,000
Intercept	1098,458	1	1098,458	7236,290	,000
RH	30,022	3	10,007	65,926	,000
Error	11,537	76	,152		
Total	1140,017	80			
Corrected Total	41,559	79			
a. R Squared = ,722 (Adjusted R Squared = ,711)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırları için, Çizelge 3.10'da görüldüğü üzere dört farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır.

Çizelge 3.10. Kızılçam statik RT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset			
		1	2	3	4
85	20	3,0570			
75	20		3,3465		
65	20			3,7380	
45	20				4,6805
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000



Şekil 3.6. Karaçam kesme gerilme sınırının bağıl neme göre değişimi.

Karaçam odunu eksen dışı statik test örneklerinin tüm düzlemlerdeki kesme gerilme sınırları, Şekil 3.6'da görüldüğü üzere rutubet içeriği artışı ile düşmüştür.

Çizelge 3.11'deki varyans analizi sonucunda karaçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme gerilme sınırlarında meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.11. Karaçam statik LR kesme gerilme sınırının varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	167,742a	3	55,914	69,778	,000
Intercept	5228,893	1	5228,893	6525,371	,000
RH	167,742	3	55,914	69,778	,000
Error	60,900	76	,801		
Total	5457,535	80			
Corrected Total	228,642	79			
a. R Squared = ,734 (Adjusted R Squared = ,723)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda karaçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme gerilme sınırları için, Çizelge 3.12'de görüldüğü üzere dört farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır.

Çizelge 3.12. Karaçam statik LR kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset			
		1	2	3	4
85	20	5,9590			
75	20		7,8020		
65	20			8,6220	
45	20				9,9555
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Çizelge 3.13'deki varyans analizi sonucunda karaçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırlarında meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.13. Karaçam statik LT kesme gerilme sınırının varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	376,186a	3	125,395	66,308	,000
Intercept	9206,126	1	9206,126	4868,097	,000
RH	376,186	3	125,395	66,308	,000
Error	143,725	76	1,891		
Total	9726,037	80			
Corrected Total	519,911	79			
a. R Squared = ,724 (Adjusted R Squared = ,713)					

Duncan testi sonucunda karaçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırları, Çizelge 3.14'deki gibi dört farklı homojenlik gurubu oluşturmuştur.

Çizelge 3.14. Karaçam statik LT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset			
		1	2	3	4
85	20	8,2095			
75	20		9,4510		
65	20			11,2750	
45	20				13,9740
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Çizelge 3.15’deki varyans analizi sonucunda karaçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırlarında meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P<0,05$) görülmüştür.

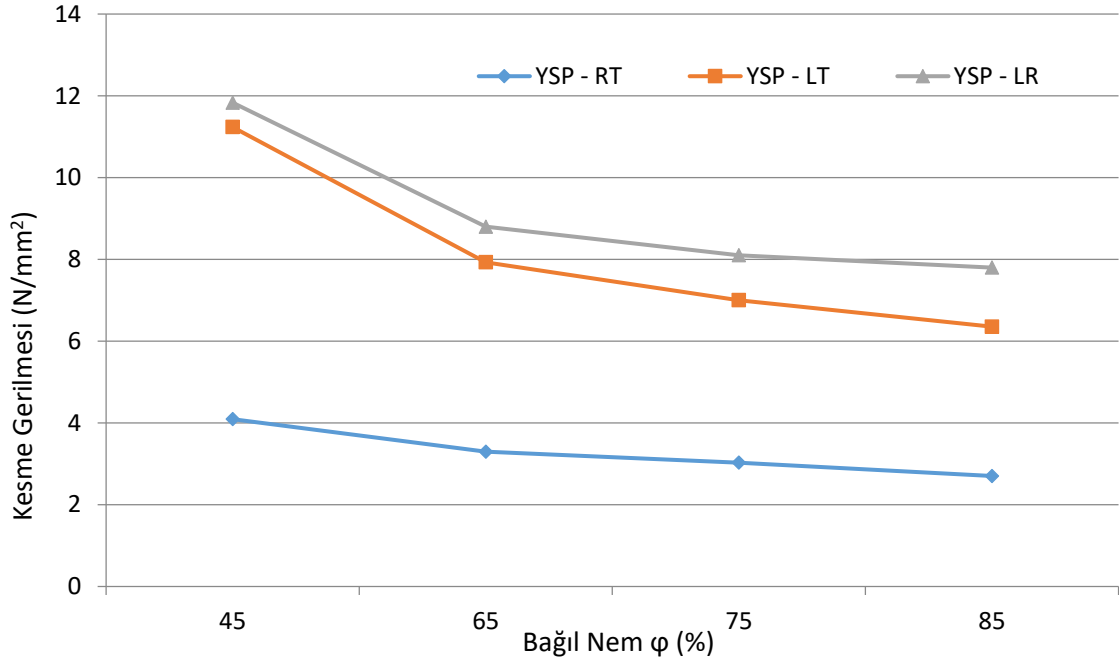
Çizelge 3.15. Karaçam statik RT kesme gerilme sınırının varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	12,288a	3	4,096	52,169	,000
Intercept	517,857	1	517,857	6596,004	,000
RH	12,288	3	4,096	52,169	,000
Error	5,967	76	,079		
Total	536,111	80			
Corrected Total	18,254	79			
a. R Squared = ,673 (Adjusted R Squared = ,660)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda karaçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırları için, Çizelge 3.16’da görüldüğü üzere dört farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır.

Çizelge 3.16. Karaçam statik RT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset			
		1	2	3	4
85	20	2,0275			
75	20		2,4110		
65	20			2,6260	
45	20				3,1125
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000



Şekil 3.7. Sarıçam kesme gerilme sınırının bağıl neme göre değişimi.

Sarıçam odunu eksen dışı statik test örneklerinin tüm düzlemlerdeki kesme gerilme sınırları, Şekil 3.7’de görüldüğü üzere rutubet içeriği artışı ile düşmüştür.

Çizelge 3.17’deki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme gerilme sınırlarında meydana gelen düşmenin anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.17 Sarıçam statik LR kesme gerilme sınırının varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	204,769a	3	68,256	40,573	,000
Intercept	6673,848	1	6673,848	3967,081	,000
RH	204,769	3	68,256	40,573	,000
Error	127,855	76	1,682		
Total	7006,472	80			
Corrected Total	332,624	79			
a. R Squared = ,616 (Adjusted R Squared = ,600)					

Duncan testi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme gerilme sınırları, Çizelge 3.18’de görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu oluşturmuştur. Buna göre %75 bağıl nemdeki kesme gerilmesi, hem birinci hem de ikinci grupta yer almışken diğer bağıl nemlerdeki gerilmeler ayrı gruplarda yer almıştır.

Çizelge 3.18. Sarıçam statik LR kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	7,8005		
75	20	8,1010	8,1010	
65	20		8,8005	
45	20			11,8325
Sig.		,466	,092	1,000

Çizelge 3.19'deki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırlarında meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.19. Sarıçam statik LT kesme gerilme sınırının varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	282,556a	3	94,185	98,668	,000
Intercept	5287,752	1	5287,752	5539,426	,000
RH	282,556	3	94,185	98,668	,000
Error	72,547	76	,955		
Total	5642,855	80			
Corrected Total	355,103	79			
a. R Squared = ,796 (Adjusted R Squared = ,788)					

Duncan testi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırları için, Çizelge 3.20'deki gibi dört farklı homojenlik gurubu oluşmuştur.

Çizelge 3.20. Sarıçam statik LT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset			
		1	2	3	4
85	20	6,3525			
75	20		7,0010		
65	20			7,9295	
45	20				11,2370
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Çizelge 3.21'deki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırlarında meydana gelen düşmenin anlamlı olduğu ($P<0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.21. Sarıçam statik RT kesme gerilme sınırının varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	21,165a	3	7,055	74,926	,000
Intercept	860,869	1	860,869	9142,841	,000
RH	21,165	3	7,055	74,926	,000
Error	7,156	76	,094		
Total	889,190	80			
Corrected Total	28,321	79			
a. R Squared = ,747 (Adjusted R Squared = ,737)					

Duncan testi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme gerilme sınırları için, Çizelge 3.22'de görüldüğü üzere dört farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır.

Çizelge 3.22. Sarıçam statik RT kesme gerilme sınırının homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset			
		1	2	3	4
85	20	2,7030			
75	20		3,0285		
65	20			3,2965	
45	20				4,0935
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

3.3. KESME MODÜLÜ

Kızılçam, karaçam ve sarıçam odununun rutubete bağlı kesme modülü değerleri, statik ve dinamik yöntemlerle belirlenmiş ve istatistiksel olarak incelenmiştir.

Kızılçam odunun eksen dışı statik test örneklerinin bağıl nem gruplarına göre ortalama kesme modülleri ve varyasyon katsayıları, duncan grubu, yoğunluk ve rutubet içeriği verileri, Çizelge 3.23'de görülmektedir. Buna göre %65, 75 ve 85 bağıl nemde meydana

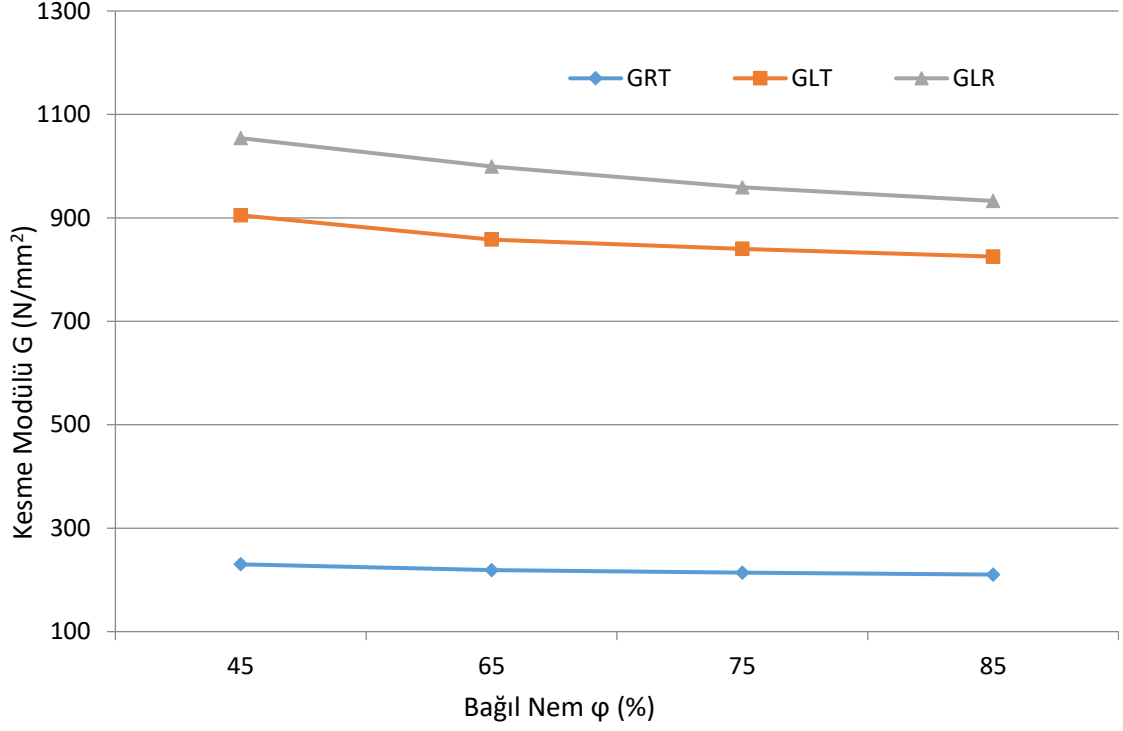
gelen kesme modülü azalışı sırası ile G_{LR} 'de %5,5, 9,9 ve 13, G_{LT} 'de %5,5, 7,7 ve 9,7 ve G_{RT} 'de %5,2, 7,5 ve 9,5 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.23. Kızılçam statik G_{LR} , G_{LT} ve G_{RT} 'sinin bulguları.

φ (%)		N	G_{LR} (N/mm ²)	HG <i>LR</i>	G_{LT} (N/mm ²)	HG <i>LT</i>	G_{RT} (N/mm ²)	HG <i>RT</i>
45	\bar{x}	20	1054,15	3	904,80	2	230,25	2
	V(%)		11,15		11,48		9,00	
	d (gr/cm ³)		0,526		0,495		0,534	
	ω (%)		9,33		9,18		9,35	
65	\bar{x}	20	999,17	2-3	858,03	1-2	218,97	1-2
	V(%)		11,93		8,68		12,33	
	d(gr/cm ³)		0,536		0,502		0,538	
	ω (%)		12,71		12,73		12,92	
75	\bar{x}	20	959,07	1-2	840,06	1	214,10	1
	V(%)		4,56		5,63		8,59	
	d(gr/cm ³)		0,545		0,508		0,541	
	ω (%)		15,09		15,59		15,14	
85	\bar{x}	20	932,67	1	825,12	1	210,29	1
	V(%)		7,56		7,57		8,56	
	d(gr/cm ³)		0,558		0,512		0,545	
	ω (%)		19,11		19,05		19,21	

V(%): Varyasyon katsayısı, ω (%): Rutubet seviyesi, φ (%): Bağlı nem, N: Örnek sayısı, L: Lif yönü, R: Radyal yön, T: Teğet yön, HG: Homojenlik Grubu, \bar{x} : Ortalama, d: Yoğunluk

Kızılçam odunu statik kesme modülü değerleri, rutubet artışı ile azalmıştır. Şekil 3.8'de görüldüğü üzere bu azalış tüm yönlerde gözlemlenmiştir.



Şekil 3.8. Kızılçam odununun statik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi.

Çizelge 3.24'deki varyans analizi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme modülünde meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.24. Kızılçam odunu statik G_{LR} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	167752,899a	3	55917,633	6,085	,001
Intercept	77817649,820	1	77817649,820	8468,790	,000
RH	167752,899	3	55917,633	6,085	,001
Error	698345,523	76	9188,757		
Total	78683748,242	80			
Corrected Total	866098,422	79			
a. R Squared = ,194 (Adjusted R Squared = ,162)					

Duncan testi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme modülü, Çizelge 3.25'de görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu oluşturmuştur. Buna göre %85 ve %45 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, ayrı grupta yer alırken %65 ve %75 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri geçişken özellik sergilemiştir.

Çizelge 3.25. Kızılçam statik G_{LR} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	932,6655		
75	20	959,0750	959,0750	
65	20		999,1695	999,1695
45	20			1054,1540
Sig.		,386	,190	,074

Çizelge 3.26'daki varyans analizi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme modülünde meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P<0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.26. Kızılçam odunu statik G_{LT} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	71780,608a	3	23926,869	4,044	,010
Intercept	58756622,742	1	58756622,742	9931,819	,000
RH	71780,608	3	23926,869	4,044	,010
Error	449615,859	76	5915,998		
Total	59278019,209	80			
Corrected Total	521396,467	79			
a. R Squared = ,138 (Adjusted R Squared = ,104)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme modülü için, Çizelge 3.27'de görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %65 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, hem bir hem de ikinci grupta yer alırken %75 ve 85 bağıl nem değerleri birinci ve %45 bağıl nem değerleri ikinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.27. Kızılçam statik G_{LT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85%	20	825,1230	
75%	20	840,0650	
65%	20	858,0305	858,0305
45%	20		904,8020
Sig.		,207	,058

Çizelge 3.28'deki varyans analizi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.28. Kızılçam odunu statik G_{RT} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	4501,349a	3	1500,450	3,133	,030
Intercept	3816138,148	1	3816138,148	7968,497	,000
RH	4501,349	3	1500,450	3,133	,030
Error	36396,636	76	478,903		
Total	3857036,133	80			
Corrected Total	40897,985	79			
a. R Squared = ,110 (Adjusted R Squared = ,075)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda kızılçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme modülü için, Çizelge 3.29'da görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %65 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, her iki grupta da yer alırken %75 ve 85 bağıl nemdeki değerler, birinci ve %45 bağıl nemdeki değerler, ikinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.29. Kızılçam statik G_{RT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	210,2970	
75	20	214,1000	
65	20	218,9750	218,9750
45	20		230,2570
Sig.		,242	,107

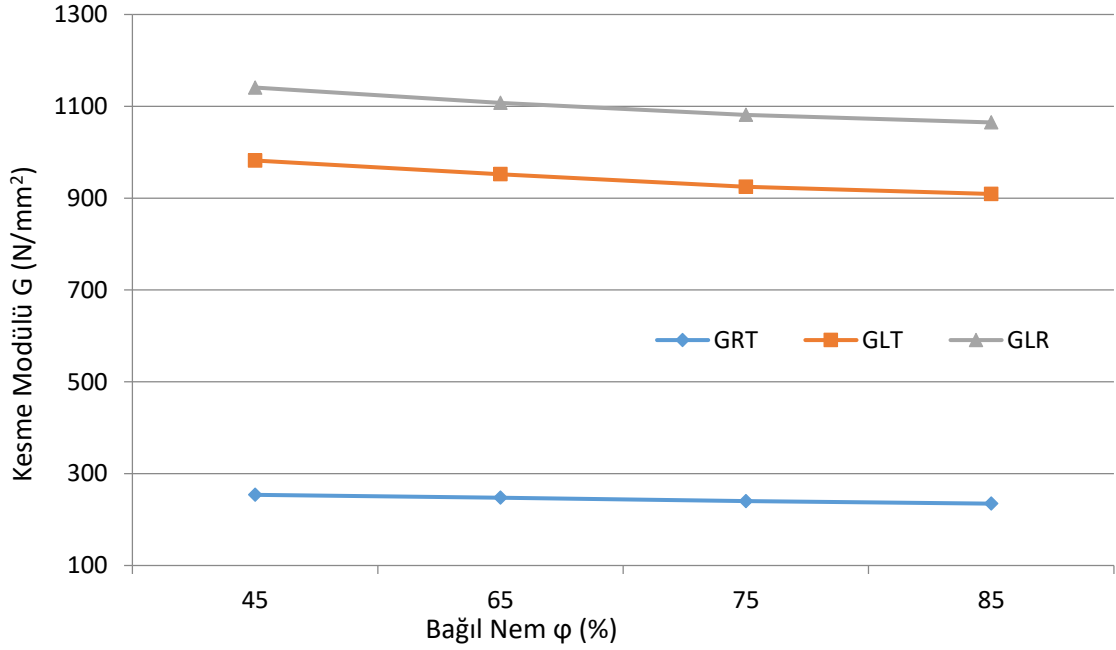
Kızılçam odunu dinamik test örneklerinin bağıl nem gruplarına göre ortalama kesme modülleri ve varyasyon katsayıları, duncan grubu, yoğunluk ve rutubet içeriği verileri, Çizelge 3.30'da görülmektedir.

Çizelge 3.30. Kızılçam dinamik G_{LR} , G_{LT} ve G_{RT} 'sinin bulguları.

φ (%)		N	G_{LR} (N/mm ²)	HG LR	G_{LT} (N/mm ²)	HG LT	G_{RT} (N/mm ²)	HG RT
45	\bar{x}	20	1140,81	2	981,82	3	253,82	2
	V(%)		6,80		7,63		6,29	
	d (gr/cm ³)		0,545		0,545		0,545	
	ω (%)		8,16		8,16		8,16	
65	\bar{x}	20	1107,53	1-2	952,09	2-3	247,59	1-2
	V(%)		9,06		5,80		8,40	
	d (gr/cm ³)		0,558		0,558		0,558	
	ω (%)		12,66		12,66		12,66	
75	\bar{x}	20	1081,37	1	924,62	1-2	240,06	1
	V(%)		6,38		4,94		8,08	
	d (gr/cm ³)		0,567		0,567		0,567	
	ω (%)		15,81		15,81		15,81	
85	\bar{x}	20	1064,92	1	909,05	1	234,68	1
	V(%)		6,03		6,13		9,66	
	d (gr/cm ³)		0,569		0,569		0,569	
	ω (%)		17,91		17,91		17,91	

V(%):Varyasyon katsayısı, ω (%):Rutubet seviyesi, φ [%]: Bağıl nem, N:Örnek sayısı, L:Lif yönü, R:Radyal yön, T:Teğet yön, HG: Homojenlik Grubu, \bar{x} :Ortalama, d:Yoğunluk

Buna göre %65, 75 ve 85 bağıl nemde meydana gelen kesme modülü azalışı, sırası ile G_{LR} 'de %3, 5,5 ve 7,1, G_{LT} 'de %3,1, 6,2 ve 8 ve G_{RT} 'de %2,5, 5,7 ve 8,2 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.9. Kızılcam odununun dinamik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi.

Kızılcam odunu dinamik kesme modülü değerleri, rutubet artışı ile azalmıştır. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere bu azalış tüm yönlerde gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.31'deki varyans analizi sonucunda kızılcam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.31. Kızılcam odunu dinamik G_{LR} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	65859,804a	3	21953,268	3,341	,024
Intercept	96564523,380	1	96564523,380	14696,532	,000
RH	65859,804	3	21953,268	3,341	,024
Error	499362,952	76	6570,565		
Total	97129746,136	80			
Corrected Total	565222,756	79			
a. R Squared = ,117 (Adjusted R Squared = ,082)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda kızılçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme modülü için, Çizelge 3.32’de görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %65 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, hem bir hem de ikinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.32. Kızılçam dinamik GLR ’sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	1064,9210	
75	20	1081,3755	
65	20	1107,5315	1107,5315
45	20		1140,8170
Sig.		,120	,198

Çizelge 3.33’deki varyans analizi sonucunda kızılçam odunu dinamik test örneklerinin LT düzlemindeki kesme modülünde rutubete bağılı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P<0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.33. Kızılçam odunu dinamik GLT ’sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	61497,048a	3	20499,016	5,622	,002
Intercept	70973653,203	1	70973653,203	19464,633	,000
RH	61497,048	3	20499,016	5,622	,002
Error	277117,876	76	3646,288		
Total	71312268,126	80			
Corrected Total	338614,924	79			
a. R Squared = ,182 (Adjusted R Squared = ,149)					

Duncan testi sonucunda kızılçam odunu dinamik test örneklerinin LT düzlemindeki kesme modülü için, Çizelge 3.34’de görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %65 bağıl nemdeki kesme modülü, ikinci ve üçüncü grupta, %75 bağıl nemdeki kesme modülü, birinci ve ikinci grupta yer almışken %45 ve 85 bağıl nemdeki kesme modülleri, sırası ile üçüncü ve birinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.34. Kızılçam dinamik G_{LT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	909,0540		
75	20	924,6240	924,6240	
65	20		952,0905	952,0905
45	20			981,8210
Sig.		,417	,154	,124

Çizelge 3.35'deki varyans analizi sonucunda kızılçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.35. Kızılçam odunu dinamik G_{RT} 'sinin varyans analizi.

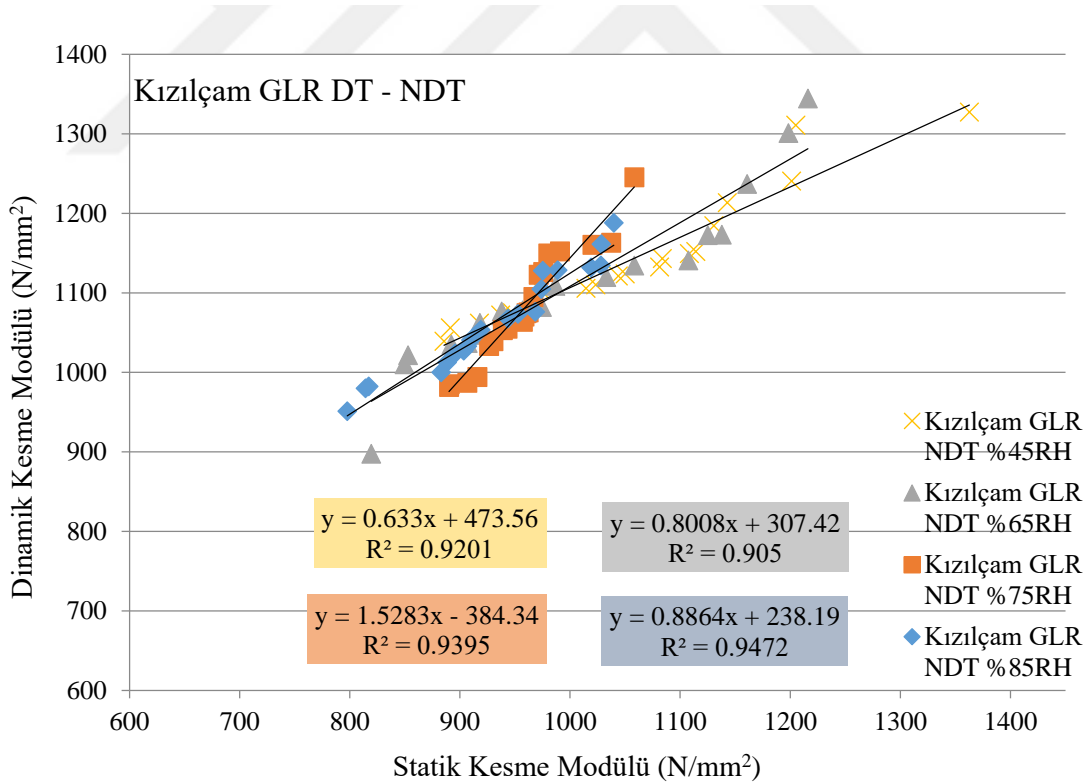
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	4234,042a	3	1411,347	3,398	,022
Intercept	4764553,987	1	4764553,987	11471,656	,000
RH	4234,042	3	1411,347	3,398	,022
Error	31565,287	76	415,333		
Total	4800353,316	80			
Corrected Total	35799,329	79			
a. R Squared = ,118 (Adjusted R Squared = ,083)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda kızılçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme modülü için, Çizelge 3.36'da görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %65 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, hem bir hem de ikinci grupta yer almıştır.

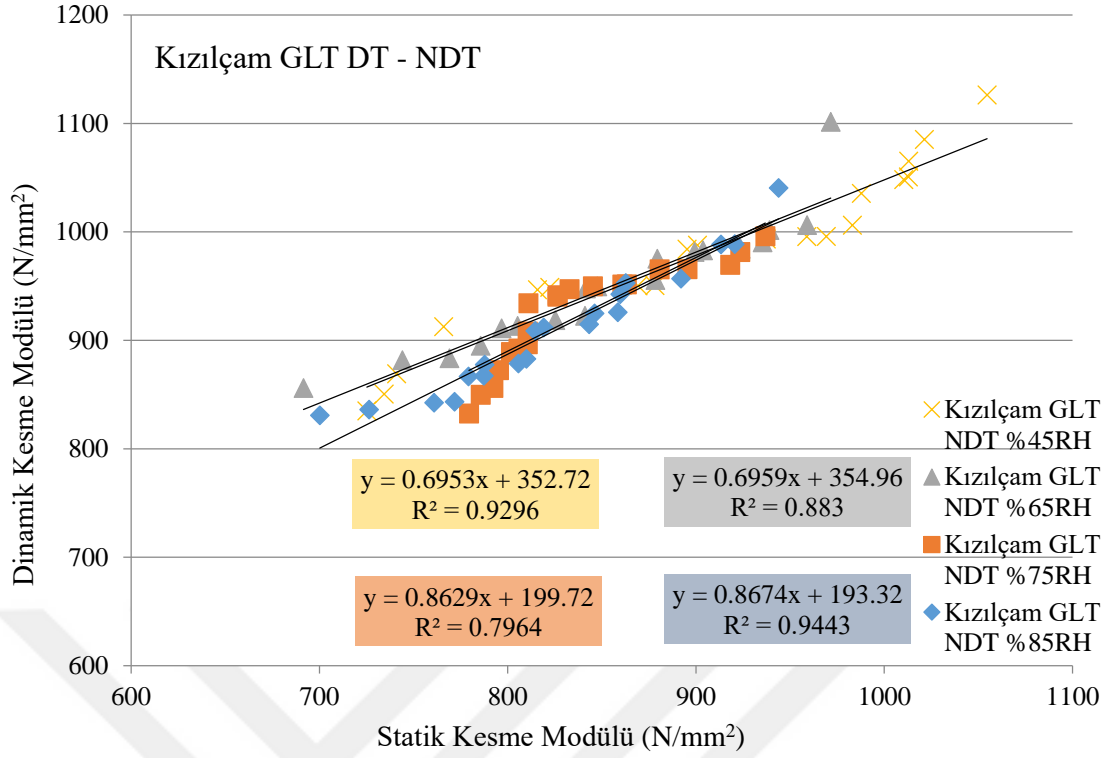
Çizelge 3.36. Kızılcşam dinamik G_{RT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	234,6860	
75	20	240,0635	
65	20	247,5975	247,5975
45	20		253,8245
Sig.		,061	,337

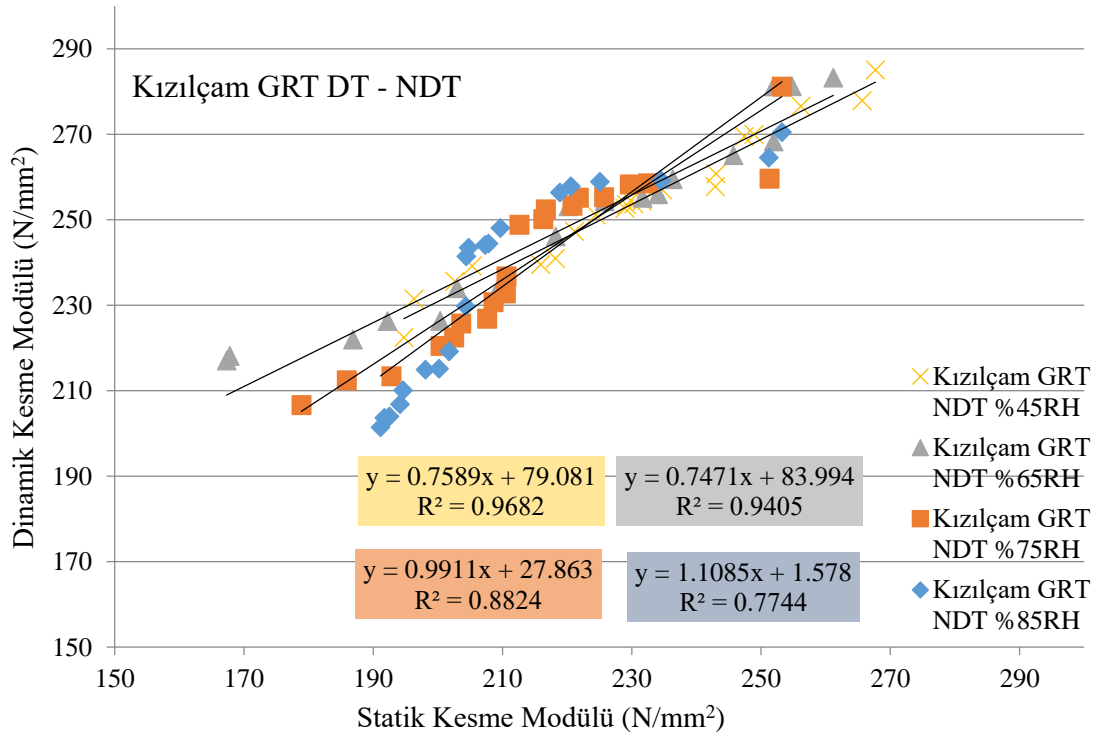
Kızılcşam odunu kesme modülünü belirlemede dinamik (ultrasonik test) yöntemin statik yöntem ile belirlenen değerleri tahmin etmedeki belirleme katsayıları ve regresyon denklemleri LR, LT ve RT düzlemlerinde bağıl neme bağlı olarak sırası ile Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de görülmektedir. Buna göre en düşük ve en yüksek belirleme katsayıları %85 bağıl nemdeki G_{RT} ($R^2:0,77$) ve %45 bağıl nemdeki G_{RT} ($R^2:0,97$)'de elde edilmiştir.



Şekil 3.10. Kızılcşam statik G_{LR} ve dinamik G_{LR} arasındaki belirleme katsayısı.



Şekil 3.11. Kızıılçam statik G_{LT} ve dinamik G_{LT} arasındaki belirleme katsayısı.



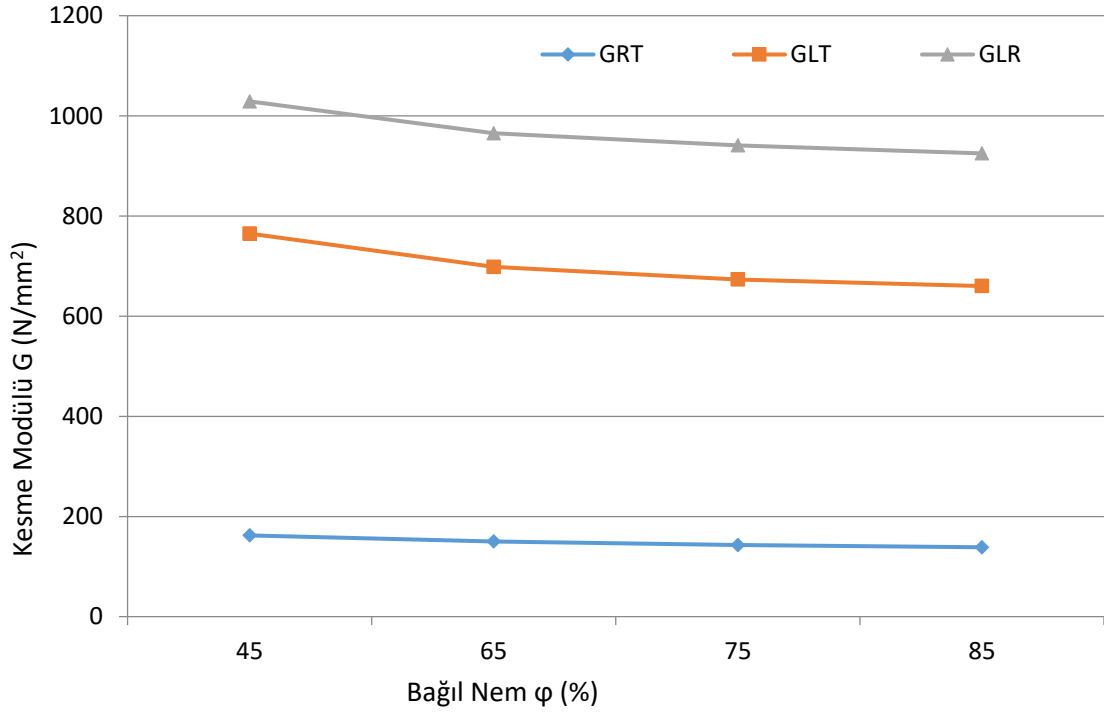
Şekil 3.12. Kızıılçam statik G_{RT} ve dinamik G_{RT} arasındaki belirleme katsayısı.

Karaçam odunun eksen dışı statik test örneklerinin bağıl nem gruplarına göre ortalama kesme modülleri ve varyasyon katsayıları, duncan grubu, yoğunluk ve rutubet içeriği verileri, Çizelge 3.37’de görülmektedir. Buna göre %65, 75 ve 85 bağıl nemde meydana gelen kesme modülü azalışı sırası ile G_{LR} ’de %6,6, 9,3 ve 11,2, G_{LT} ’de %9,5, 13,6 ve 15,9 ve G_{RT} ’de %8,1, 13,5 ve 17,2 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.37. Karaçam statik G_{LR} , G_{LT} ve G_{RT} ’sinin bulguları.

φ (%)		N	G_{LR} (N/mm ²)	HG <i>LR</i>	G_{LT} (N/mm ²)	HG <i>LT</i>	G_{RT} (N/mm ²)	HG <i>RT</i>
45	\bar{x}	20	1028,87	2	764,98	2	162,36	3
	V(%)		8,86		11,44		9,02	
	d (gr/cm ³)		0,530		0,519		0,534	
	ω (%)		8,85		8,92		8,7	
65	\bar{x}	20	965,30	1	698,36	1	150,25	2
	V(%)		12,37		11,03		11,84	
	d (gr/cm ³)		0,541		0,531		0,542	
	ω (%)		12,57		12,45		12,56	
75	\bar{x}	20	941,21	1	673,30	1	143,09	1-2
	V(%)		5,79		4,76		9,99	
	d (gr/cm ³)		0,550		0,542		0,554	
	ω (%)		14,49		14,33		14,8	
85	\bar{x}	20	925,15	1	660,22	1	138,56	1
	V(%)		10,38		9,33		13,03	
	d (gr/cm ³)		0,563		0,567		0,563	
	ω (%)		18,83		19,57		18,46	

V(%):Varyasyon katsayısı, ω (%):Rutubet seviyesi, φ [%]: Bağıl nem, N:Örnek sayısı, L:Lif yönü, R:Radyal yön, T:Teğet yön, HG: Homojelik Grubu, \bar{x} :Ortalama, d:Yoğunluk



Şekil 3.13. Karaçam odununun statik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi.

Karaçam odunu statik kesme modülü değerleri, rutubet artışı ile azalmıştır. Şekil 3.13’de görüldüğü üzere bu azalış, tüm yönlerde gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.38’deki varyans analizi sonucunda karaçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.38. Karaçam odunun statik G_{LR} ’sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	124669,205a	3	41556,402	4,543	,006
Intercept	74519231,513	1	74519231,513	8146,212	,000
RH	124669,205	3	41556,402	4,543	,006
Error	695226,433	76	9147,716		
Total	75339127,151	80			
Corrected Total	819895,638	79			
a. R Squared = ,152 (Adjusted R Squared = ,119)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda karaçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme modülü için, Çizelge 3.39’da görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 bağıl nemdeki kesme modülü değeri, ikinci grupta yer alırken diğer kesme modülü değerleri birinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.39. Karaçam statik GLR ’sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	925,1580	
75	20	941,2150	
65	20	965,2995	
45	20		1028,8775
Sig.		,216	1,000

Çizelge 3.40’daki varyans analizi sonucunda karaçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme modülünde rutbete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P<0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.40. Karaçam odunu statik GLT ’sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	130358,735a	3	43452,912	8,968	,000
Intercept	39112660,703	1	39112660,703	8072,456	,000
RH	130358,735	3	43452,912	8,968	,000
Error	368235,155	76	4845,199		
Total	39611254,593	80			
Corrected Total	498593,889	79			
a. R Squared = ,261 (Adjusted R Squared = ,232)					

Duncan testi sonucunda karaçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme modülü için, Çizelge 3.41’de görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 bağıl nemdeki kesme modülü değeri, ikinci grupta yer alırken diğer kesme modülü değerleri, birinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.41. Karaçam statik G_{LT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	660,2245	
75	20	673,3050	
65	20	698,3650	
45	20		764,9845
Sig.		,105	1,000

Çizelge 3.42'deki varyans analizi sonucunda karaçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.42. Karaçam odunu statik G_{RT} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	6460,678a	3	2153,559	7,711	,000
Intercept	1765816,850	1	1765816,850	6322,420	,000
RH	6460,678	3	2153,559	7,711	,000
Error	21226,379	76	279,294		
Total	1793503,906	80			
Corrected Total	27687,057	79			
a. R Squared = ,233 (Adjusted R Squared = ,203)					

Duncan testi sonucunda karaçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme modülü, Çizelge 3.43'de görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu oluşturmuştur.

Çizelge 3.43. Karaçam statik G_{RT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	138,5670		
75	20	143,0950	143,0950	
65	20		150,2535	
45	20			162,3600
Sig.		,394	,180	1,000

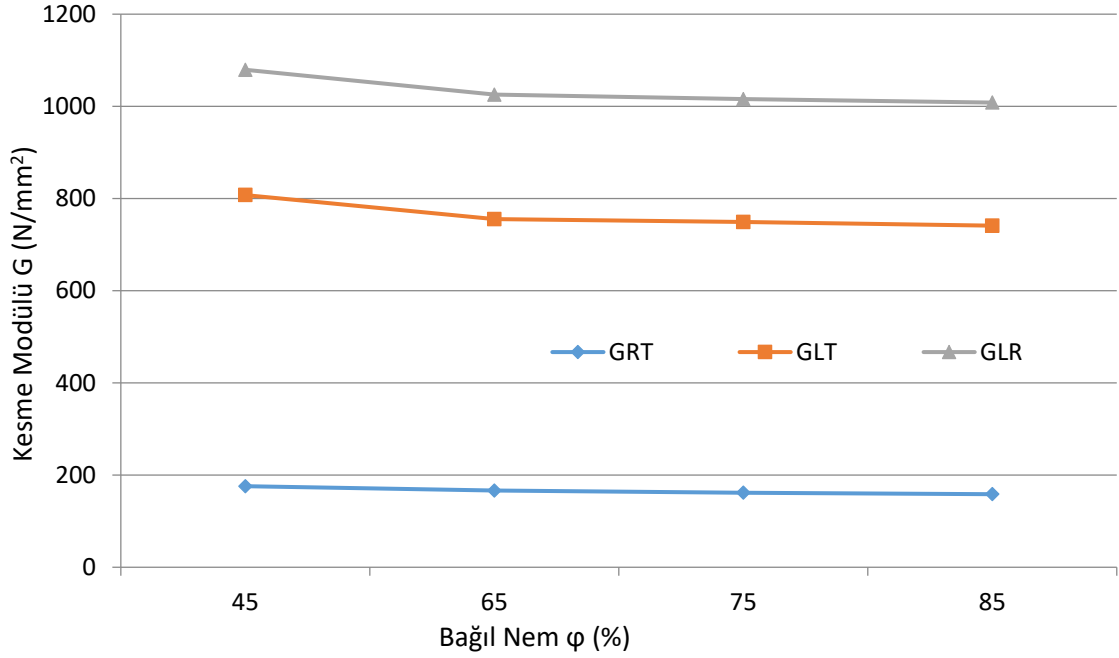
Buna göre %45, %65 ve %85 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, ayrı grupta yer alırken %75 bağıl nemdeki kesme modülü değeri, hem bir hem de ikinci grupta yer almıştır.

Karaçam odunu dinamik test örneklerinin bağıl nem gruplarına göre ortalama kesme modülleri ve varyasyon katsayıları, duncan grubu, yoğunluk ve rutubet içeriği verileri, Çizelge 3.44’de görülmektedir. Buna göre %65, 75 ve 85 bağıl nemde meydana gelen kesme modülü azalışı, sırası ile G_{LR} ’de %5,2, 6,2 ve 7, G_{LT} ’de %6,9, 7,8 ve 9 ve G_{RT} ’de %5,7, 8,7 ve 10,8 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.44. Karaçam dinamik G_{LR} , G_{LT} ve G_{RT} ’sinin bulguları.

ϕ (%)		N	G_{LR} (N/mm ²)	HG LR	G_{LT} (N/mm ²)	HG LT	G_{RT} (N/mm ²)	HG RT
45	\bar{x}	20	1079,18	2	807,54	2	175,75	2
	V(%)		6,58		4,60		7,91	
	d (gr/cm ³)		0,520		0,520		0,520	
	ω (%)		7,93		7,93		7,93	
65	\bar{x}	20	1025,43	1	755,26	1	166,48	1-2
	V(%)		10,55		5,12		9,00	
	d (gr/cm ³)		0,541		0,541		0,541	
	ω (%)		12,4		12,4		12,4	
75	\bar{x}	20	1015,71	1	749,11	1	161,68	1
	V(%)		7,32		7,13		9,99	
	d (gr/cm ³)		0,552		0,552		0,552	
	ω (%)		14,69		14,69		14,69	
85	\bar{x}	20	1008,32	1	741,00	1	158,65	1
	V(%)		5,87		5,52		8,95	
	d (gr/cm ³)		0,570		0,570		0,570	
	ω (%)		16,51		16,51		16,51	

V(%):Varyasyon katsayısı, ω (%):Rutubet seviyesi, ϕ (%): Bağıl nem, N:Örnek sayısı, L:Lif yönü, R:Radyal yön, T:Teğet yön, HG:Homojenlik Grubu, \bar{x} :Ortalama, d:Yoğunluk



Şekil 3.14. Karaçam odununun dinamik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi.

Karaçam odunu dinamik kesme modülü değerleri, rutubet artışı ile azalmıştır. Şekil 3.14’de görüldüğü üzere bu azalış tüm yönlerde gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.45’deki varyans analizi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.45. Karaçam odunu dinamik G_{LR} ’sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	61886,248a	3	20628,749	3,042	,034
Intercept	85229311,481	1	85229311,481	12567,243	,000
RH	61886,248	3	20628,749	3,042	,034
Error	515421,520	76	6781,862		
Total	85806619,249	80			
Corrected Total	577307,768	79			

a. R Squared = ,107 (Adjusted R Squared = ,072)

Duncan testi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme modülü için, Çizelge 3.46’da görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 bağıl nemdeki kesme modülü değeri, ikinci grupta yer alırken diğerleri, birinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.46. Karaçam dinamik G_{LR} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	1008,3280	
75	20	1015,7185	
65	20	1025,4375	
45	20		1079,1795
Sig.		,541	1,000

Çizelge 3.47'deki varyans analizi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin LT düzlemindeki kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P<0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.47. Karaçam odunu dinamik G_{LT} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	54416,435a	3	18138,812	9,323	,000
Intercept	46601877,395	1	46601877,395	23952,221	,000
RH	54416,435	3	18138,812	9,323	,000
Error	147866,986	76	1945,618		
Total	46804160,817	80			
Corrected Total	202283,421	79			
a. R Squared = ,269 (Adjusted R Squared = ,240)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin LT düzlemindeki kesme modülü için, Çizelge 3.48'de görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 bağıl nemdeki kesme modülü değeri, ikinci grupta yer alırken diğerleri birinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.48. Karaçam dinamik G_{LT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	741,0085	
75	20	749,1115	
65	20	755,2600	
45	20		807,5490
Sig.		,341	1,000

Çizelge 3.49'daki varyans analizi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.49. Karaçam odunu dinamik G_{RT} 'sinin varyans analizi.

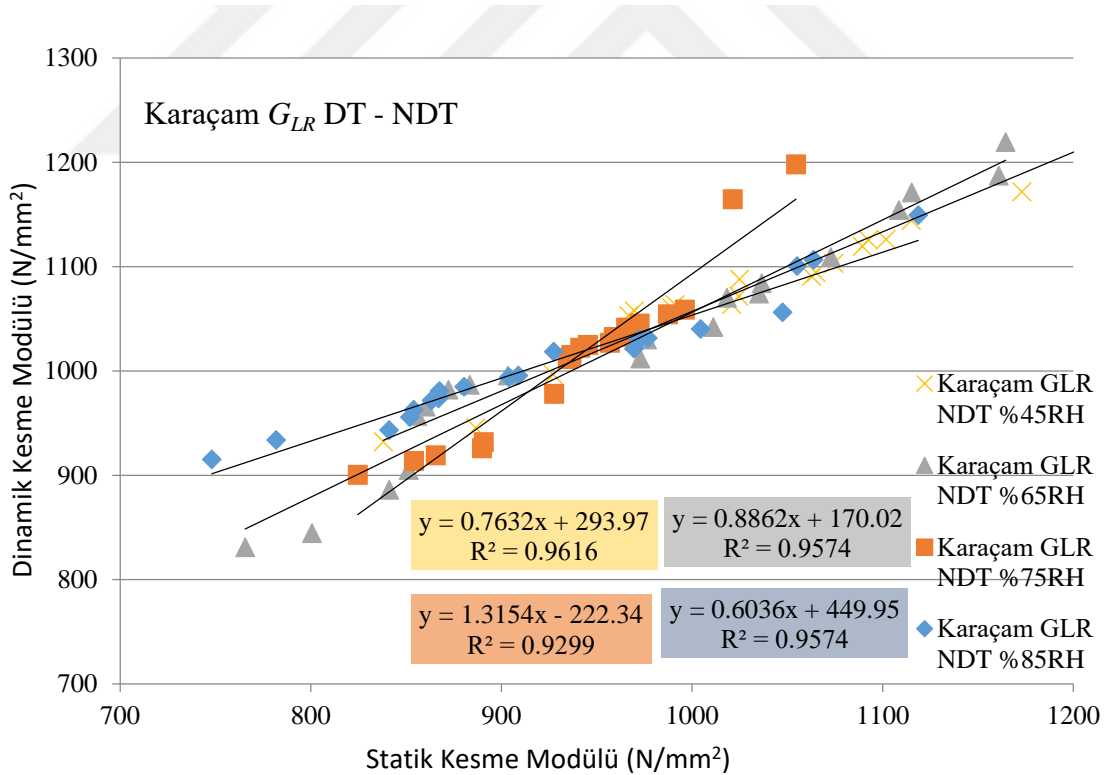
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	3348,646a	3	1116,215	4,819	,004
Intercept	2195024,840	1	2195024,840	9476,920	,000
RH	3348,646	3	1116,215	4,819	,004
Error	17602,964	76	231,618		
Total	2215976,450	80			
Corrected Total	20951,610	79			
a. R Squared = ,160 (Adjusted R Squared = ,127)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme modülü için, Çizelge 3.50'de görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %65 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, hem bir hem de ikinci grupta yer almıştır.

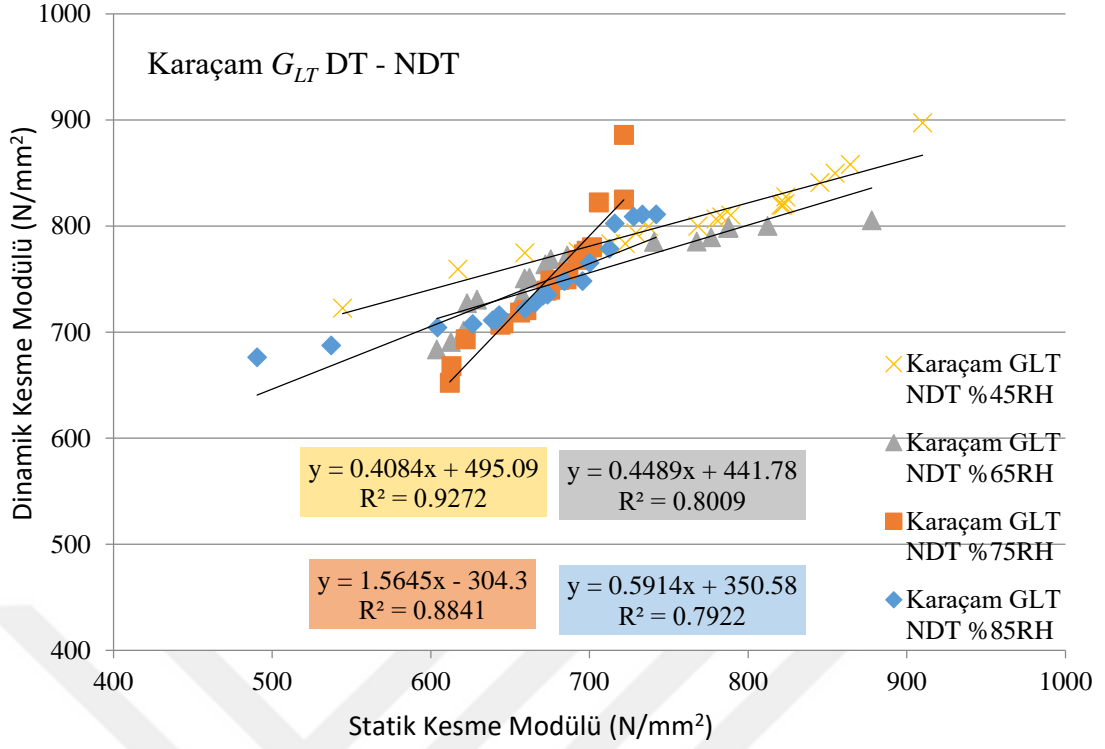
Çizelge 3.50. Karaçam dinamik G_{RT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	158,6550	
75	20	161,6830	
65	20	166,4835	166,4835
45	20		175,7530
Sig.		,129	,058

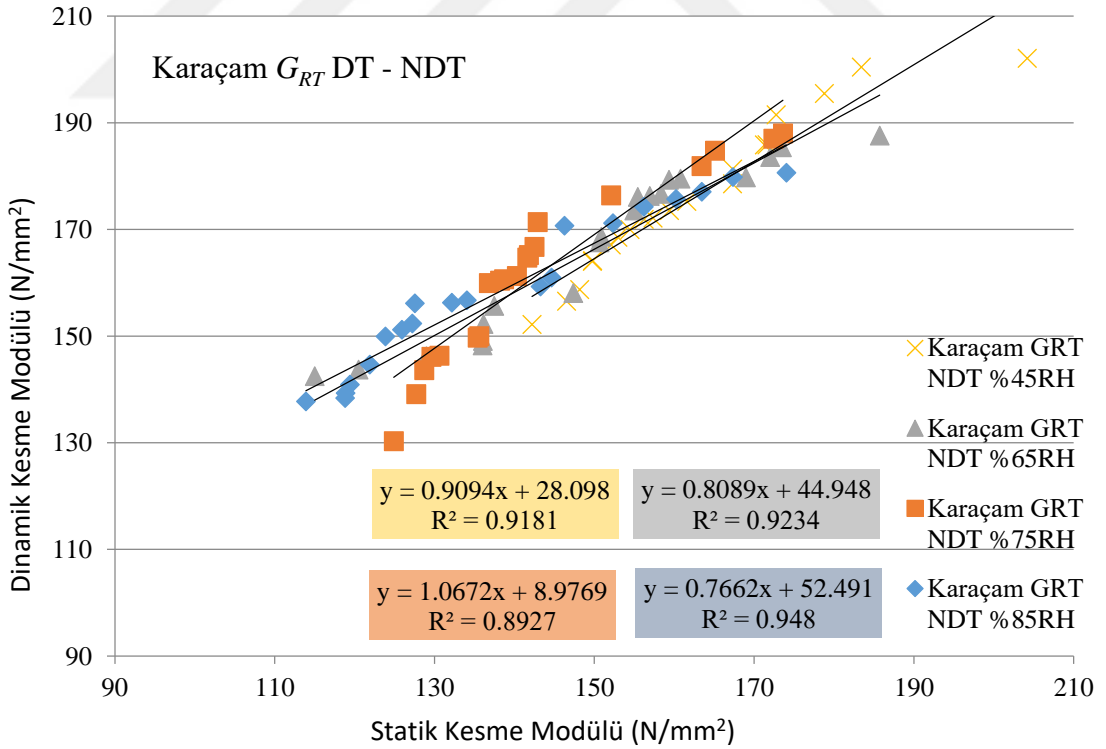
Karaçam odunu kesme modülünü belirlemede dinamik (ultrasonik test) yöntemin statik yöntem ile belirlenen değerleri tahmin etmedeki belirleme katsayıları ve regresyon denklemleri, LR, LT ve RT düzlemlerinde bağıl neme bağlı olarak sırası ile Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de görülmektedir. Buna göre en düşük ve en yüksek belirleme katsayıları %85 bağıl nemdeki G_{LT} ($R^2:0,79$) ve %45 bağıl nemdeki G_{LR} ($R^2:0,96$)'de elde edilmiştir.



Şekil 3.15. Karaçam statik G_{LR} ve dinamik G_{LR} arasındaki belirleme katsayısı.



Şekil 3.16. Karaçam statik G_{LT} ve dinamik G_{LT} arasındaki belirleme katsayısı.



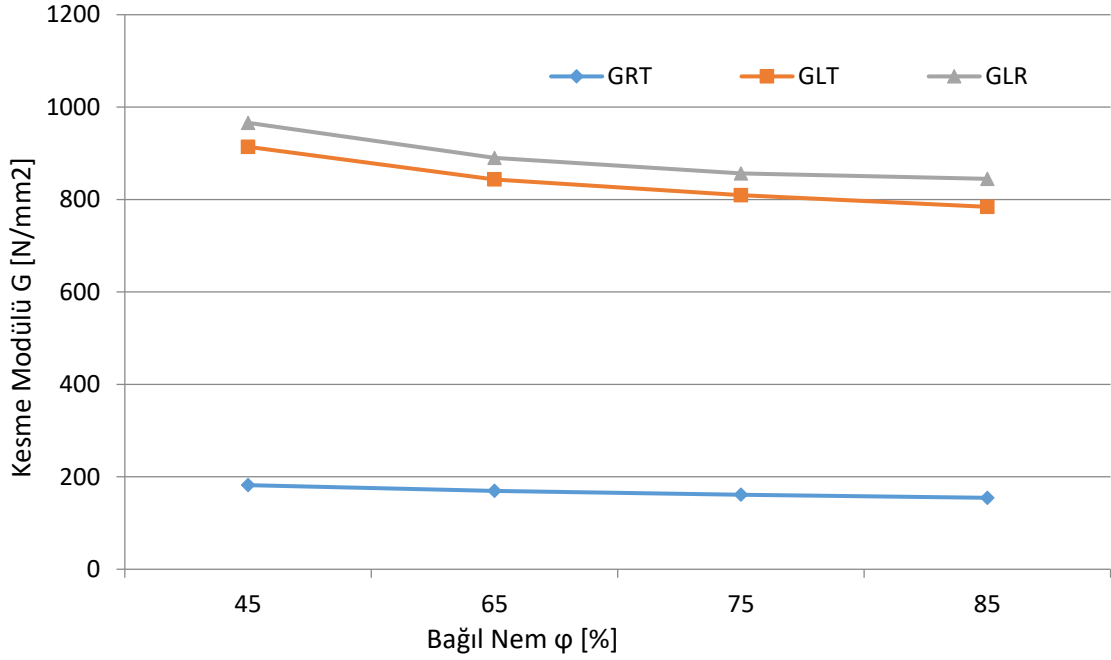
Şekil 3.17. Karaçam statik G_{RT} ve dinamik G_{RT} arasındaki belirleme katsayısı.

Sarıçam odununun eksen dışı statik test örneklerinin bağıl nem gruplarına göre ortalama kesme modülleri ve varyasyon katsayıları, duncan grubu, yoğunluk ve rutubet içeriği verileri, Çizelge 3.51’de görülmektedir. Buna göre %65, 75 ve 85 bağıl nemde meydana gelen kesme modülü azalışı, sırası ile G_{LR} ’de %8,5, 12,8 ve 14,3, G_{LT} ’de %8,3, 12,9 ve 16,6 ve G_{RT} ’de %7,4, 12,9 ve 17,9 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.51. Sarıçam statik G_{LR} , G_{LT} ve G_{RT} ’sinin bulguları.

φ (%)		N	G_{LR} (N/mm ²)	HG LR	G_{LT} (N/mm ²)	HG LT	G_{RT} (N/mm ²)	HG RT
45	\bar{x}	20	965,91	2	914,03	2	182,08	3
	V(%)		12,13		13,46		8,11	
	d(gr/cm ³)		0,512		0,508		0,534	
	ω (%)		9,12		8,8		9,19	
65	\bar{x}	20	890,171	1	843,53	1	169,56	2
	V(%)		12,28		11,46		10,60	
	d(gr/cm ³)		0,513		0,513		0,539	
	ω (%)		12,53		12,62		12,68	
75	\bar{x}	20	856,48	1	809,39	1	161,25	1-2
	V(%)		5,93		8,71		8,29	
	d(gr/cm ³)		0,514		0,520		0,543	
	ω (%)		15,33		14,85		15,52	
85	\bar{x}	20	844,69	1	784,10	1	154,44	1
	V(%)		8,09		7,23		9,48	
	d(gr/cm ³)		0,541		0,532		0,549	
	ω (%)		19,69		19,24		19,28	

V(%): Varyasyon katsayısı, ω (%): Rutubet seviyesi, φ (%): Bağıl nem, N: Örnek sayısı, L: Lif yönü, R: Radyal yön, T: Teğet yön, HG: Homojenlik Grubu, \bar{x} : Ortalama, d: Yoğunluk



Şekil 3.18. Sarıçam odununun statik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi.

Sarıçam odunu statik kesme modülü değerleri, rutubet artışı ile azalmıştır. Şekil 3.18’de görüldüğü üzere bu azalış tüm yönlerde gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.52’deki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.52. Sarıçam odunu statik G_{LR} ’sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	178758,834a	3	59586,278	6,878	,000
Intercept	63270671,401	1	63270671,401	7303,299	,000
RH	178758,834	3	59586,278	6,878	,000
Error	658410,845	76	8663,301		
Total	64107841,080	80			
Corrected Total	837169,679	79			

a. R Squared = ,214 (Adjusted R Squared = ,182)

Duncan testi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı LR statik test örneklerinin kesme modülü için, Çizelge 3.53’de görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 bağıl nemdeki kesme modülü değeri, ikinci grupta yer alırken diğerleri birinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.53. Sarıçam statik GLR 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	844,6955	
75	20	856,4800	
65	20	890,1705	
45	20		965,9190
Sig.		,149	1,000

Çizelge 3.54'deki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.54. Sarıçam odunu statik GLT 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	190690,992a	3	63563,664	7,394	,000
Intercept	56148099,395	1	56148099,395	6531,214	,000
RH	190690,992	3	63563,664	7,394	,000
Error	653363,297	76	8596,885		
Total	56992153,684	80			
Corrected Total	844054,289	79			

a. R Squared = ,226 (Adjusted R Squared = ,195)

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı LT statik test örneklerinin kesme modülü için, Çizelge 3.55' de görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 bağıl nemdeki kesme modülü değeri, ikinci grupta yer alırken diğerleri birinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.55. Sarıçam statik G_{LT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	784,1045	
75	20	809,3900	
65	20	843,5360	
45	20		914,0320
Sig.		,058	1,000

Çizelge 3.56'daki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.56. Sarıçam odunu statik G_{RT} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	8490,794a	3	2830,265	11,512	,000
Intercept	2226806,807	1	2226806,807	9057,448	,000
RH	8490,794	3	2830,265	11,512	,000
Error	18684,879	76	245,854		
a. R Squared = ,312 (Adjusted R Squared = ,285)					

Duncan testi sonucunda sarıçam odunu eksen dışı RT statik test örneklerinin kesme modülü, Çizelge 3.57'de görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu oluşturmuştur. Buna göre %45, %65 ve %85 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, ayrı grupta yer alırken %75 bağıl nemdeki kesme modülü değeri, birinci ve ikinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.57. Sarıçam statik G_{RT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

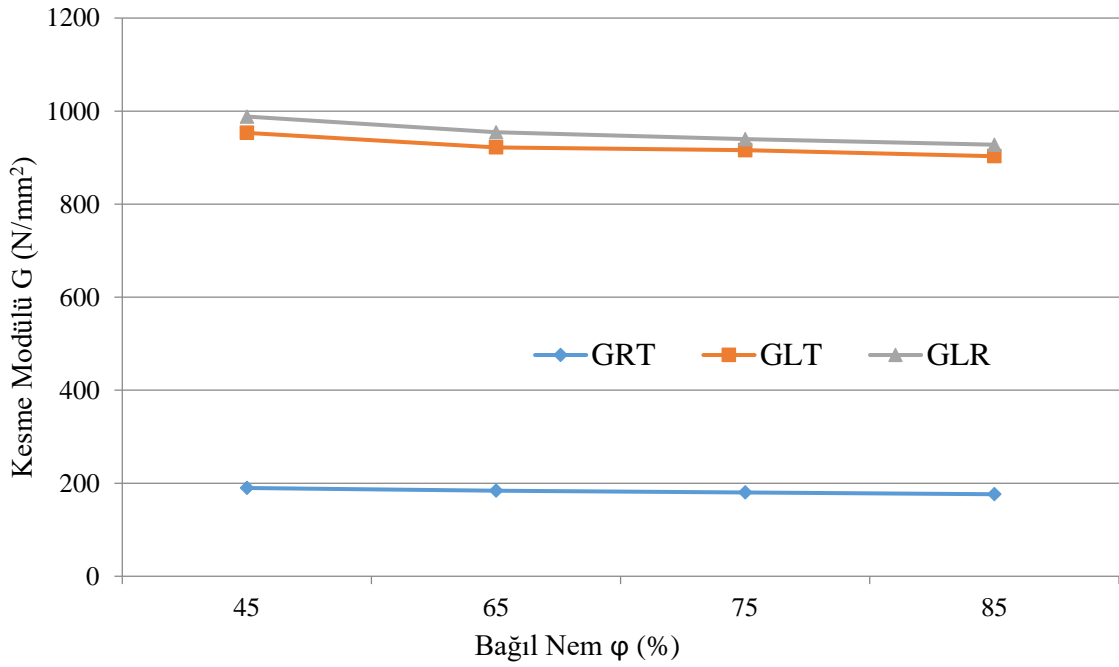
Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	154,4490		
75	20	161,2550	161,2550	
65	20		169,5660	
45	20			182,0840
Sig.		,174	,098	1,000

Sarıçam odunu dinamik test örneklerinin bağıl nem gruplarına göre ortalama kesme modülleri ve varyasyon katsayıları, duncan grubu, yoğunluk ve rutubet içeriği verileri, Çizelge 3.58’de görülmektedir. Buna göre %65, 75 ve 85 bağıl nemde meydana gelen kesme modülü azalışı, sırası ile G_{LR} ’de %3,5, %5,2 ve %6,5, G_{LT} ’de %3,4, %4,1 ve %5,6 ve G_{RT} ’de %3,1, %5,3 ve %7,6 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.58. Sarıçam dinamik G_{LR} , G_{LT} ve G_{RT} ’sinin bulguları.

φ (%)		N	G_{LR} (N/mm ²)	HG LR	G_{LT} (N/mm ²)	HG LT	G_{RT} (N/mm ²)	HG RT
45	\bar{x}	20	988,34	2	953,31	2	189,74	2
	V(%)		9,72		5,40		9,96	
	d(gr/cm ³)		0,546		0,546		0,546	
	ω (%)		7,94		7,94		7,94	
65	\bar{x}	20	954,63	1-2	922,07	1-2	183,99	1-2
	V(%)		5,39		4,94		4,99	
	d(gr/cm ³)		0,552		0,552		0,552	
	ω (%)		13,04		13,04		13,04	
75	\bar{x}	20	939,73	1-2	916,06	1-2	180,20	1-2
	V(%)		6,97		7,30		7,37	
	d(gr/cm ³)		0,557		0,557		0,557	
	ω (%)		14,34		14,34		14,34	
85	\bar{x}	20	927,80	1	903,11	1	176,419	1
	V(%)		7,93		9,12		8,56	
	d(gr/cm ³)		0,560		0,560		0,560	
	ω (%)		16,37		16,37		16,37	

V(%):Varyasyon katsayısı, ω (%):Rutubet seviyesi, φ (%): Bağıl nem, N:Örnek sayısı, L:Lif yönü, R:Radyal yön, T:Teğet yön, HG: Homojenlik Grubu, \bar{x} :Ortalama, d:Yoğunluk



Şekil 3.19. Sarıçam odununun dinamik kesme modülü ve bağıl neme göre değişimi.

Sarıçam odunu dinamik kesme modülü değerleri, rutubet artışı ile azalmıştır. Şekil 3.19’da görüldüğü üzere bu azalış tüm yönlerde gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.59’daki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı ($P>0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.59. Sarıçam odunu dinamik G_{LR} ’sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	41248,374a	3	13749,458	2,421	,073
Intercept	72599894,195	1	72599894,195	12782,251	,000
RH	41248,374	3	13749,458	2,421	,073
Error	431660,438	76	5679,743		
Total	73072803,007	80			

a. R Squared = ,087 (Adjusted R Squared = ,051)

Duncan testi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme modülü için, Çizelge 3.60’da görüldüğü üzere iki farklı homojenlik grubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 ve %85 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, ayrı gruplarda yer alırken %65 ve %75 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, her iki grupta da yer almıştır.

Çizelge 3.60. Sarıçam dinamik G_{LR} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	927,8005	
75	20	939,7335	939,7335
65	20	954,6295	954,6295
45	20		988,3455
Sig.		,294	,056

Çizelge 3.61'deki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin LT düzlemindeki kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı ($P>0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.61. Sarıçam odunu dinamik G_{LT} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	27234,880a	3	9078,293	2,158	,100
Intercept	68249052,696	1	68249052,696	16221,374	,000
RH	27234,880	3	9078,293	2,158	,100
Error	319758,847	76	4207,353		
a. R Squared = ,078 (Adjusted R Squared = ,042)					

Duncan testi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin LT düzlemindeki kesme modülü için, Çizelge 3.62'de görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 ve %85 bağıl nemdeki kesme modülleri, ayrı gruplarda yer alırken %65 ve %75 bağıl nemdeki kesme modülleri, her iki grupta da yer almıştır.

Çizelge 3.62. Sarıçam dinamik G_{LT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	903,1135	
75	20	916,0605	916,0605
65	20	922,0775	922,0775
45	20		953,3135
Sig.		,389	,090

Çizelge 3.63'deki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme modülünde rutubete bağlı meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.63. Sarıçam odunu dinamik G_{RT} 'sinin varyans analizi.

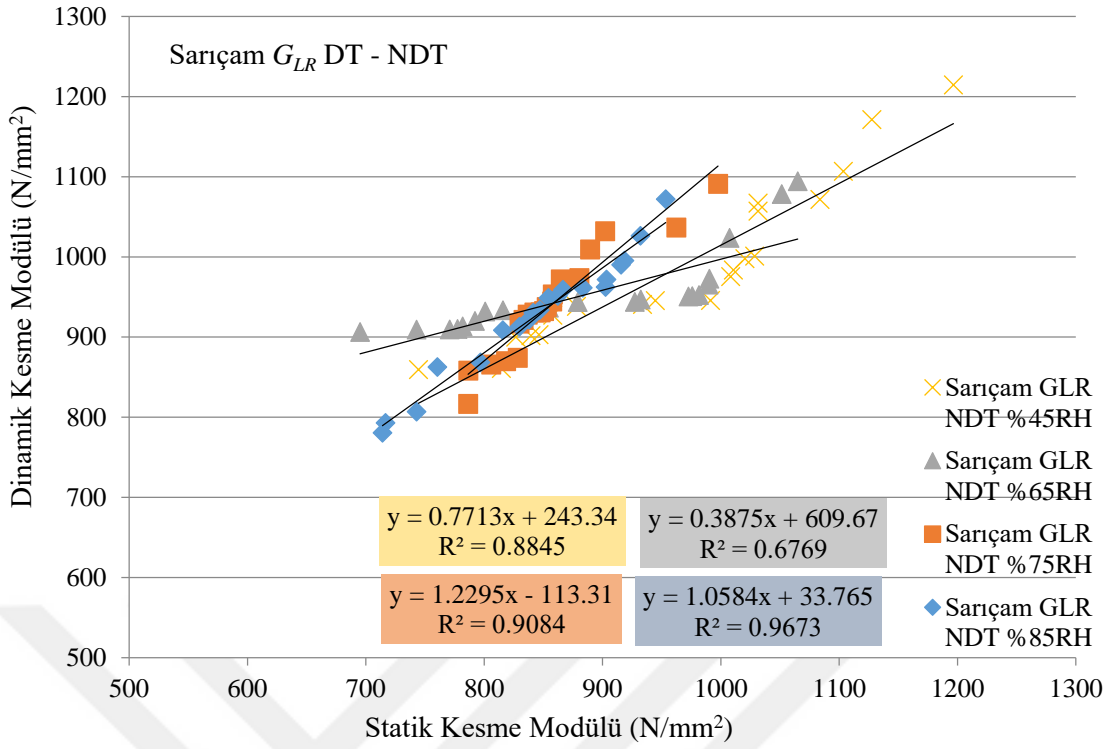
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1939,660a	3	646,553	2,903	,040
Intercept	2667132,300	1	2667132,300	11975,851	,000
RH	1939,660	3	646,553	2,903	,040
Error	16925,899	76	222,709		
Total	2685997,859	80			
Corrected Total	18865,559	79			
a. R Squared = ,103 (Adjusted R Squared = ,067)					

Duncan testi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme modülü için, Çizelge 3.64'de görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 ve %85 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, ayrı gruplarda yer alırken %65 ve %75 bağıl nemdeki kesme modülü değerleri, her iki grupta da yer almıştır.

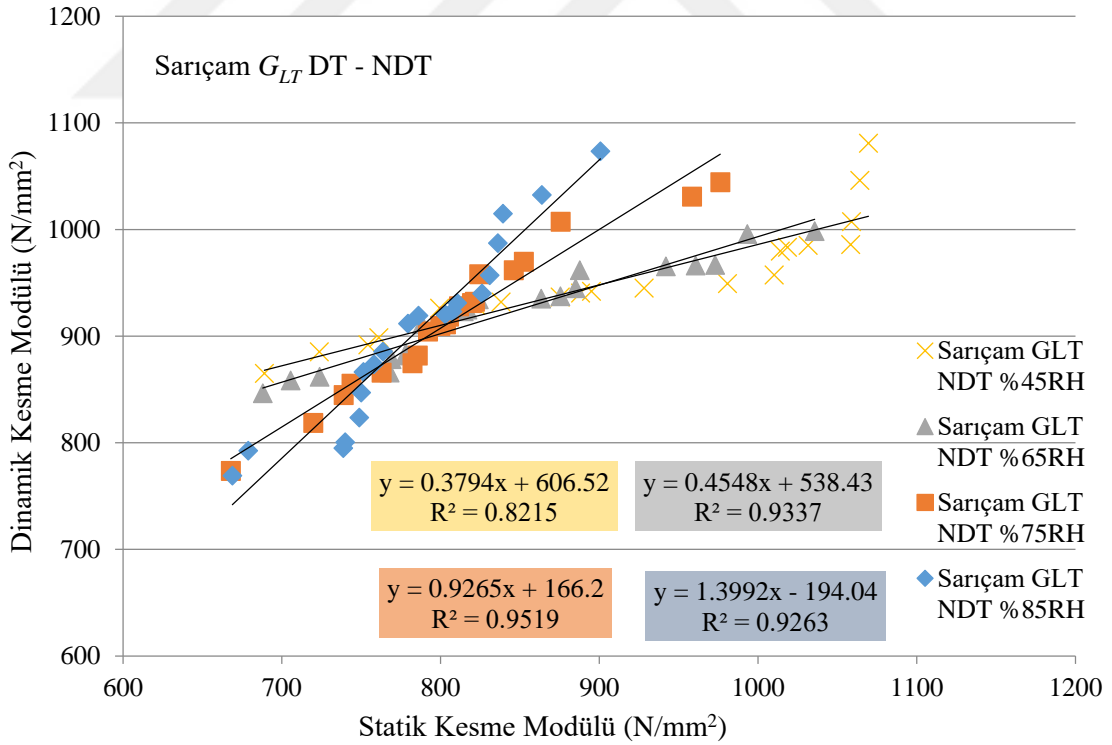
Çizelge 3.64. Sarıçam dinamik G_{RT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	176,4190	
75	20	180,2015	180,2015
65	20	183,9925	183,9925
45	20		189,7475
Sig.		,134	,059

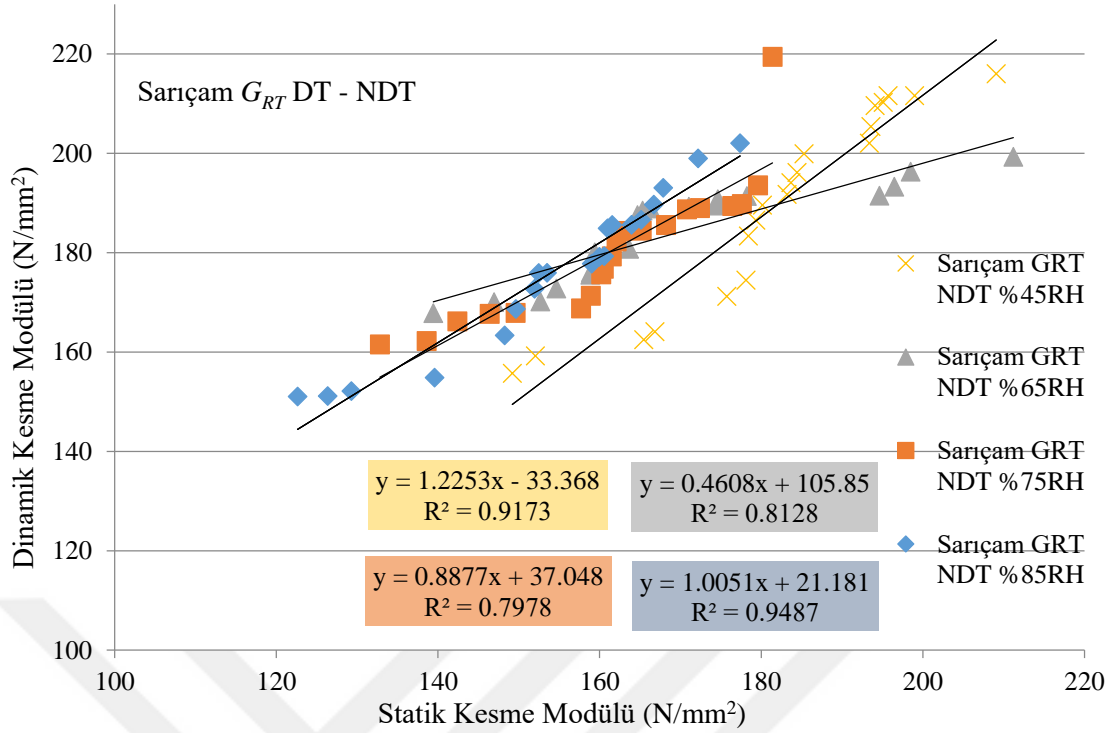
Sarıçam odunu kesme modülünü belirlemede dinamik yöntemin statik yöntem ile belirlenen değerleri tahmin etmedeki belirleme katsayıları ve regresyon denklemleri LR, LT ve RT düzlemlerinde bağıl neme bağlı olarak sırası ile Şekil 3.20, Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de görülmektedir. Buna göre en düşük ve en yüksek belirleme katsayıları %65 bağıl nemdeki G_{LR} ($R^2:0,68$) ve %85 bağıl nemdeki G_{LR} ($R^2:0,97$)'de elde edilmiştir.



Şekil 3.20. Sarıçam statik G_{LR} ve dinamik G_{LR} arasındaki belirleme katsayısı.

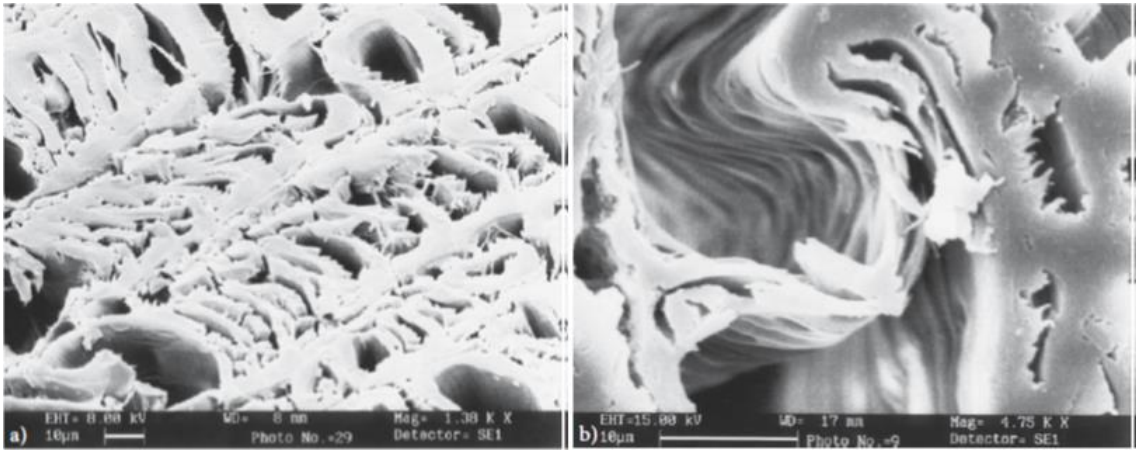


Şekil 3.21. Sarıçam statik G_{LT} ve dinamik G_{LT} arasındaki belirleme katsayısı.



Şekil 3.22. Sarıçam statik G_{RT} ve dinamik G_{RT} arasındaki belirleme katsayısı.

Şekil 3.23'de görüldüğü üzere odundaki gözenekler ya da traheler (vessel), kesme deformasyonu sonucu düzensiz bir şekilde eliptik hale gelerek oluklaşmaktadır. Deforme olmuş trakelerin etrafındaki lifler de çok sıkışmış olarak görülmektedir. Şekil incelendiğinde sadece görece küçük çaptaki liflerin gerçek şekillerini koruyabildiği görülmektedir [105]. Bu çalışmada eksen dışı basma testi sonucu meydana gelen kesme davranışının odunların hücre yapısında nasıl bir deformasyona neden olduğu görüntü analizi ile belirlenmemiş olup bu konu ayrı bir çalışma olarak değerlendirilebilir.



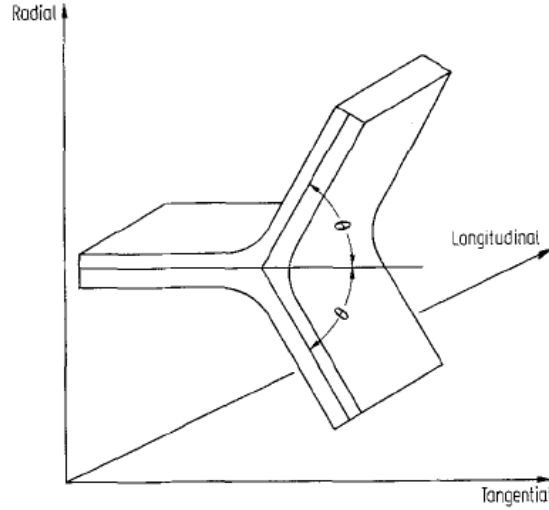
Şekil 3.23. Kesmenin RT kesitli ladin (a) ve kiraz (b) odunu hücre yapısında oluşturduğu deformasyonlar [105].

Gillis [424] odunun elastik sabitlerinden olan Young modülü (E) ile kesme modülü (G) arasındaki ilişkiyi $E_L > E_R > G_{LR} \approx G_{LT} > E_T > G_{RT}$ olarak göstermiş ve odunun tüm elastik özelliklerinin borumsu hücrelerin yapısal düzenine sıkı sıkıya bağlı olduğunu belirtmiştir.

Elastik özelliklerin anizotropisi hücre yapısının temel geometrik karakteristiğidir. Odunun anizotropik elastik esnemezliği (katılık), izotropik yapısal malzemenin geometrik düzeni üzerinden kapsamlı bir biçimde anlaşılabilir [424]. Ayan [107] odun yapısının düzensizleşmesi ile de ses yayılma hızının azaldığını belirtmiştir.

Birçok odun türünde ilkbahar odunu, R yönü boyunca uzanım eğilimi gösterir ve hacmin büyük çoğunluğunu oluştururken yaz odunu genellikle T yönü boyunca uzanım gösterir ve daha düşük hacme sahiptir. R ve T yönlerindeki şekil değiştirme oranları, Şekil 3.24'de görülen ve traheid geometrisinin yaklaşık tahmini olan simetrik üçlü noktaya göre her hangi bir kolun uzunluğundaki ve veya açısındaki farklılık ile değişir [424]. R ve T yöndeki hücre duvarlarının eş olması durumunda, komşu hücrelerin yapısal düzeni, hücrelerin enine kesit şekilleri ve öz ışın hücrelerinin yoğunluğu transvers anizotropiyi etkileyen en önemli etkenler olarak görülmektedir. Öz ışınların varlığı, R ve T yöndeki çekme değerlerindeki farklılıkları ciddi oranda arttırmaktadır [425].

Hücre duvarlarının eğilmeye tepkisi çekme ve basmada birbirinden farklıdır. Hücre duvarının eğilmesi, G_{RT} 'nin diğer yönlerdeki kesme modülü değerlerinden oldukça düşük olmasına neden olur. Ayrıca, Şekil 3.24'de gösterilen üçlü noktanın mekanik davranışının analizinden anlaşılacağı üzere modüllerin sıralanışı, $G_{LR} \approx G_{LT} > G_{RT}$ olarak gerçekleşir. Yeterince büyük açılarda G_{LR} , G_{LT} 'den birazcık büyük iken her ikisinin de G_{RT} 'den oldukça büyük olduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir [424]. Brabec vd. [426]'ne göre G_{LR} 'nin G_{LT} 'den büyük olması, öz ışınların odunun kesme katılığına yaptığı etki sonucu ortaya çıkmaktadır. Odunun RT düzlemindeki katılığı ise LR ve LT'nin 1/3 ya da 1/4'u kadardır [427], Bodig ve Goodman [428] ve Neumann [429]. Dolayısı ile bu çalışmadaki kesme modüllerinin $G_{LR} > G_{LT} > G_{RT}$ şeklinde sıralanışı literatürle uyumlu olup, G_{LR} 'nin G_{LT} 'den büyük olması, yukarıda açıklanan yeterince büyük açılarda varlığı gibi etkenlere bağlanabilir. Bunun yanında G_{LT} 'nin G_{LR} 'den büyük olduğu değerler, Hearmon [134] tarafından ladin odunu için sırası ile 7,7 ve 7,5 10^8 N/m^2 olarak belirtilmiştir.



Şekil 3.24. Simetrik üçlü nokta [424].

Küçük deformasyonlarda yapısal malzeme doğrusal elastik ve izotrop olarak kabul edilir ve gerilmeye verdiği tepki Young modülü (E) ve Poisson oranı (ν) olmak üzere iki bağımsız elastik sabit ile belirlenir [424].

Koponen vd. [425] %9 rutubetli ve 500kg/m^3 yoğunluklu odun modellemesi (WOOD2) ile G_{LT} , G_{LR} ve G_{RT} 'yi sırası ile 670, 1000 ve 38N/mm^2 olarak belirlemiştir. Aynı kaynakta bu oranların yumuşak ağaçlar için sırası ile 510-830, 500-1750 ve $23-85\text{N/mm}^2$ aralığında olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada elde edilen G_{LT} , G_{LR} verileri Koponen vd. [425] ile uyum gösterirken G_{RT} değerleri, çok daha yüksek belirlenmiştir.

Niemz vd. [349]'ne göre iğne yapraklı ağaçlar, genellikle daha düşük yoğunlukludur. Odunda düşük yoğunluk, iyi işlenebilirlik fakat aynı zamanda daha düşük direnç parametreleri ve Young's ve kesme modülü anlamına gelmektedir. Leite vd. [430] 844kg/m^3 yoğunluklu *Copaifera langsdorffii* odunu kesme modülünü dinamik olarak 2217MPa olarak belirlemiş ve kesme modülünün yoğunluk ile ters ilişkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Fakat denklem (2.9), (2.10) ve (2.11)'e göre yoğunluk artışı ile kesme modülünün artacağı görülmektedir. Buradaki çelişki yoğunluk artışının dalga yayılımı üzerine yaptığı etki ile ilgili olabilir. Literatürde ultrasonik dalga hızının yoğunluktan olumsuz [431], olumlu [190], [260], [285], [288], [302], [432] ve ne olumlu ne de olumsuz [330], [433]–[435] etkilendiği belirtilmiştir. Bu çalışmada tüm malzeme yoğunlukları rutubet içeriğine bağlı olarak artmıştır. Yoğunluk artışı ile birlikte gelen rutubet içeriği artışının ultrasonik kesme dalgalarının yayılım hızını düşürdüğü düşünülmektedir. Her ne kadar yoğunluk artsa da ses hızındaki düşüşe bağlı

olarak dinamik kesme modülleri düşmüştür.

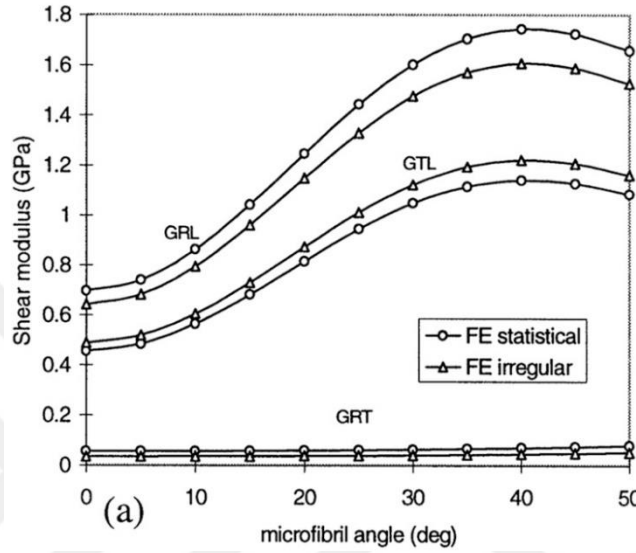
Bunun yanında çürüklüğün kesme modülüne etkisi yoğunluğun etkisinden daha fazladır. Schubert vd. [436] mantarlı Norveç ladini kesme modülünü belirlemek için rezonans ultrasonik spektroskopi kullanmış ve çürüklük nedeni ile kesme modülünde meydana gelen azalmanın yoğunluktaki azalmadan 6-10 kat fazla olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada kullanılan örneklerin yapısında çürüklük gibi süreksizlikler bulunmamaktadır.

Hearmon [134] 550kg/m^3 yoğunluklu sarıçam odunu G_{RT} , G_{LT} ve G_{LR} değerlerini, sırası ile 66, 680 ve 1160N/mm^2 olarak belirtmiştir. Aira vd. [173] İspanyol sarıçamı G_{RT} , G_{LT} ve G_{LR} 'sini sırasıyla 737, 1280 ve 1334N/mm^2 . Bu çalışmada sarıçam odununun %45 bağıl nemdeki G_{RT} , G_{LT} ve G_{LR} değerleri, sırası ile 182, 914 ve 966N/mm^2 olarak belirtmiştir. Dinamik olarak ise sırasıyla 190, 953 ve 988N/mm^2 olarak belirlenmiştir. Tallavo vd. [258] odunun elastik, plastik ve direnç özelliklerinin aynı tür olsa bile kayda değer oranda değiştiğini belirtmiştir. Zira Moya ve Bano [174] ve USDA [22]'nin belirttiği *Pinus elliotti* ve *P. Taeda* odunları kesme modülü değerlerinde görüldüğü üzere ciddi farklılıklar olabilmektedir. Dolayısı ile aynı türe ait olsa da testlerden elde edilen verilerin farklılık göstermesi, türlerin orijini, yetiştirme koşulları, örneklerin şekli ve boyutu, uygulanan test, kullanılan teknolojik gereç ve fikstür, şartlandırma gibi bir çok etkene bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Zira ağaç malzeme gibi homojen olmayan malzemelerin kesme modülünün hesaplanabilmesi için homojen bir gerilme alanı gereklidir. Bunun için birçok çalışma normal basma, eğilme, çekme gerilmeleri ya da bükülme gerilmelerine anlamlı bir etkisi olmadan istenilen düzleme kesme gerilmesinin nasıl yüklenebileceği üzerinde durmuştur. Sretenovic vd. [215] blok kesme testi konfigürasyonunu sonlu elemanlar şeklinde gerçekleştirmiştir. Szalai [145], Liu vd. [146], Pierron [147], Liu [148], De Magistris ve Salmen [149] Iospescu ve eksen dışı çekme testinin gerçek malzeme özelliklerine muhtemelen çok yakın değerler sağlayan kullanışlı testler olduğunu belirtmiştir. Arcan vd. [150] tarafından geliştirilen Arcan testi de saf homojen gerilme alanı sağlayan bir diğer testtir. Iospescu, eksen dışı basma ve Arcan testi Xavier vd. [154], [155] tarafından ağaç malzemenin kesme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Melin [153] çalışmasında ortotropik malzemelerin kesme testinde kullanılan Iospescu fikstürünün iyileştirilmesini sağlamıştır. Bu çalışmada da homojen bir kesme gerilmesi elde edebilmek için eksen dışı basma testi tercih edilmiştir. Eksen dışı basma testinde kullanılan bi-aksiyal ekstensometrenin

sağladığı gerilme-şekil değiştirme verilerinin etkinliği çalışmanın tamamlayıcı yanı olarak gerçekleştirilecek iki ya da üç boyutlu video ekstensometre kullanılarak gerçekleştirilen testlerde elde edilen verilerle karşılaştırılarak gerçekleştirilecektir.

Simpson ve TenWolde [27]'ye göre odunun fiziksel ve mekanik özellikleri yoğun bir şekilde malzemenin temel yönlerine ve (anatomi, hücre duvarı makro moleküler düzen gibi) yapısına bağlıdır. Elde edilen kesme modüllerine bakıldığında bu durum açıkça görülmektedir. Zira bu çalışma ile %65 bağıl nemde iklimlendirilen ve 541kg/m^3 yoğunluklu ve %12,4 rutubet içerikli karaçam odununun RT, LT ve LR düzlemindeki statik kesme modülleri, sırası ile 150, 698 ve 965N/mm^2 olarak belirlenmişken dinamik kesme modülleri, sırasıyla 166, 755 ve 1025N/mm^2 olarak belirlenmiştir. Güntekin ve Yılmaz Aydın [423] %65 bağıl nemde iklimlendirme sonucu 530kg/m^3 yoğunluklu ve %11,7 rutubet içeriğine sahip 20mm'lik küpler ile karaçam odununun RT, LT ve LR düzlemlerindeki dinamik kesme modüllerini sırası ile 159, 527 ve 743N/mm^2 olarak belirlemiştir. Bu çalışmada belirlenen değerler arasındaki farklar sırası ile 166 (%4,4), 755 (%43,3) ve 1025 (%38) olarak hesaplanmıştır. Güntekin vd. [422] 530kg/m^3 yoğunluklu ve %12,5 rutubet içeriğine sahip 20mm'lik küpler ile kızılçam odununun RT, LT ve LR düzlemlerindeki kesme modüllerini dinamik olarak sırası ile 235, 850 ve 1150N/mm^2 olarak belirlemiştir. Bu çalışma ile belirlenen RT, LT ve LR düzlemindeki kesme modülleri, ilgili çalışmadaki verilerden sırası ile %5,1, %12 ve -%3,74 farklılık göstermiştir. Karaçam ve kızılçam dinamik kesme modülündeki bu farklılıkların, ağaçların yetiştirme koşulları, ağaç yaşı, örneklerin alındığı yer ve örnek geometrisi, ilkbahar ve yaz odunu iştirak oranı, yıllık halka açısı ve eğimi, mikroskobik yapı, ekstraktif madde içeriği, temas maddesi kullanımı, ultrasonik ölçüm parametreleri, propagasyon özellikleri vb. gibi çeşitli etkenlere bağlı olarak meydana gelebileceği düşünülmektedir. James [71], Gerhards [35], Bucur ve Böhnke [437] ve Wang [438] odun mazlemesinde akustik ölçüm verilerinin, rutubet içeriği, sıcaklık, test örneği boyutları, akustik ölçüm sistemleri ve kullanılan enstrümandan etkilendiğini belirtmiştir. Baradit vd. [186] kısmen küçük odun örneklerinde odun duvarlarında çok fazla yansıma olduğunu ve enine dalgaların çok belirgin olmayıp boyuna dalgalar ile bütünleştiğini belirtmiştir. Llana vd. [264]'ne göre örnek geometrisi, yapısal odunda dalga yayılım modu ve akustik hız üzerine ciddi etkiye sahiptir. Bu bakış açısı ile 20mm'lik küpler ile elde edilen kesme modülleri arasındaki farklılıklar örnek boyutuna da bağlı olabilir.

Mason vd. [439]'ne göre ultrasonik dalga hızı, önemli ölçüde mikrofibril açısı (MFA) ile ilişkilidir. Odunun mikrofibril açısında meydana gelen açısal farklılıkların kesme modülüne etkisi Astley vd. [440] tarafından incelenmiş ve Şekil 3.25'deki gibi görselleştirilmiştir. Araştırmacılar %12 rutubet içeriğine sahip 390kg/m^3 yoğunluklu odununun hücrelerini mikro ölçekte gerçeğe yakın modelleyerek ANSYS'de SEA gerçekleştirmiş ve MFA'nın kesme modülü üzerine etkisini belirlemiştir.



Şekil 3.25. Mikrofibril açısının kesme modülüne etkisi.

Göker vd. [441]'ne göre kızılçam odununda eğilme direnci ve Elastikiyet modülünde sırası ile %10 ve %15 lif sapması ve/veya kıvrıklılığı anlamlı farklılıklar ortaya çıkarmamaktadır. Basınç gerilmelerinde lif kıvrıklığı toleransı %20 veya biraz daha fazla olabilmektedir. Dinamik eğilme direncinde lif kıvrıklılığı %10'a kadar kabul edilebilir. Lif kıvrıklığı olan odunda teğet, diyagonal liflilik olan odunda ise radyal yönde kesme gerilmelerinin oluşturulması önerilmiştir. Çalışmada lif kıvrıklığı derecesi arttıkça kesme direnci, $65,41$ (%0-5 kıvrıklılık) kg/cm^2 'den $86,25$ (%20'den fazla kıvrıklılık) kg/cm^2 'ye çıktığı belirtilmiştir. Şekil 3.25'da görüldüğü üzere MFA'nda 40° 'ye varan açılar, kesme modülünü arttırmaktadır. Göker vd. [441]'nin lif kıvrıklığı derecesi artışının kesme direncine olumlu etkisi bununla benzer bir ilişkiyi ortaya koymaktadır. Bu çalışmada test edilen örneklerin bu anlamdaki (MFA ve lif kıvrıklığı) etkisi incelenmemiştir fakat Yoshihara ve Matsumoto [157]'nin belirttiği gibi yıllık halkaların olabildiğince düz olması sağlanarak kavis etkisi en aza indirilmiştir.

Bucur [105]'a göre ultrases hızı ve sinyal azalımında rutubet içeriğinin etkisi vardır. Ultrasonik teknikler gibi tahribatsız test yöntemleri, rutubet içeriğinden etkilenir çünkü

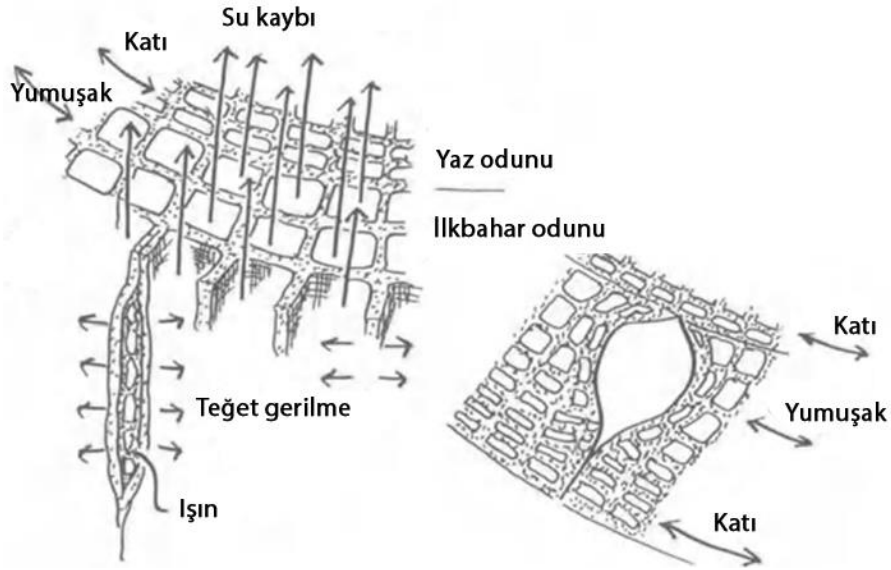
L, R ve T doğrultusundaki ses hızları rutubet içeriğinin LDN'ye kadar artışı ile düşer [101], [263], [285], [287], [291], [442]–[448]. Rutubet içeriğinin LDN üzerinde olması durumundaki azalım için ise hücre lümenlerinin içindeki serbest suyun rolüne atıf yapılmıştır [105]. Yaklaşık 20°C sabit sıcaklıkta %12 rutubet içeriğine sahip kusursuz odunun kesme modülü, odundaki rutubet içeriğinin %6'ya düşmesi ile %20 artarken rutubet içeriğinin %20'ye çıkması durumunda %20 azalmaktadır [17]. Bu çalışmada test örneklerinin bağıl nem değerlerinin %65'den %45'e düşmesi ya da %85'e çıkması durumunda meydana gelen en fazla değişim, statik değerlerde sırası ile +%8,7 (karaçam G_{LT}) ve -%9,8 (sarıçam G_{RT}) olarak gerçekleşmişken dinamik değerlerde +%6,5 (karaçam G_{LT}) ve -%5,5 (kızılçam G_{RT}) olarak gerçekleşmiştir.

Bachtiar vd. [192] ceviz odunu LR, LT ve RT kesme modüllerindeki en sert düşüşlerin, Şekil 1.13'de görüldüğü üzere rutubet içeriğinin %7,5'den %9,5'e çıkması esnasında olduğunu belirtmiştir. Rutubet içeriğinin %12 üzerine çıktığı durumlarda ise değişim oranının düşük olduğunu belirtmiştir. Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da görüldüğü üzere bu çalışmada elde edilen hem dinamik hem de statik ölçüm verileri, benzer bir davranışı ortaya koymuştur.

Rutubet, odun ile temas ettiğinde su molekülleri hücre duvarının içine penetre olur ve hidrojen bağı ile hücre duvarı bileşenlerine bağ kurar. Bu durum LDN ye kadar devam etmesi durumunda odun şişer. Bu noktadan sonra su alan odunda herhangi bir boyutsal değişim olmaz çünkü bu sular lümen boşluğunda serbest su olarak bulunur. Bu durumun tersi, odunun su vermesi durumunda da geçerlidir [449]. Odun su ilişkisi, mekanik davranışın belirlenmesinde en önemli parametrelerden birisidir ve Bodig ve Jayne [9], Skaar [450], Haygreen ve Bowyer [41] ve USDA [22] gibi birçok referans kaynaktan detaylı olarak ele alınmıştır. Odunun hemen hemen tüm direnç ve katılık (stiffness) özellikleri, rutubet içeriğinin LDN noktasına kadar artışı ile düşerken LDN noktasından sonraki artışlarda sabit kalır [296]. Rutubet içeriğinin LDN üstündeki değerlere doğru artması, mekanik özellikler üzerinde ciddi bir değişikliğe neden olmaz [35]. Fakat Lif doygunluğu üzerinde rutubet içeriğine sahip kusursuz odunun kesme modülü değeri, sıcaklık 20°C'den 50°C'ye çıktığında %25 azalır [32]. Bu çalışmada 20°C sabit sıcaklıkta rutubet içeriğinin değişimi incelenmiş ve rutubet içeriği artışının tüm düzlemlerdeki kesme modülü değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir. Sıcaklığın yerel türler olan kızılçam, karaçam ve sarıçam odunlarının kesme modülüne etkisi henüz belirlenmemiş olup bu çalışmanın tamamlayıcı yönü olarak gerçekleştirilebilir.

Elastikiyet, rijitlik, direnç vd. malzeme özelliklerinin tahribatsız değerlendirilmesindeki temel rolü nedeni ile mikro-strüktürün önemine dikkat edilmelidir [96]. Odunun rijitliği ya da katılığı, mekanik gerilmeleri odunun katılığını sağlayan kristalize selülozlara iletebilme kapasitesine bağlıdır [451]. Bununla birlikte ağaç malzeme hücre duvarının özellikleri makromekanik davranışı belirler. Anizotropik özellik sergileyen bu davranış, ilkbahar ve yaz odunu katmanlarının değişimi nedeni ile meydana gelir. Odunda katılığı oluşturan temel bileşen selüloz, yaz odununda daha fazla oranda bulunmaktadır. Selülozun aksine hemiselüloz rutubet değişimlerinden çok ciddi şekilde etkilenir [1].

Odundaki katılığın ilkbahar ve yaz odununa göre değişimi, enine kesitte Şekil 3.26'de görülmektedir [452]. Buradaki kuraklık çatlakları da odunun yapısındaki düzensizlik ve veya süreksizlik örneğidir. Dolayısı ile ilkbahar ve yaz odunu katmanlarındaki değişimin kesme modülü üzerine etkisini belirleyebilmek için mikro mekanik deneylerin yapılması gereklidir.



Şekil 3.26. Odundaki düzensizlik ve katılık durumu.

3.4. ULTRASONİK ÖLÇÜM BULGULARI

Kızılçam, karaçam ve sarıçam odunlarının dinamik kesme modülleri, ultrasonik ses dalgalarının yayılım hızları ile elde edilmiştir. Test örneklerinin bağıl nemine bağlı olarak dalga ses hızlarının (V_{ij}) nasıl etkilendiği, efektif frekans (EF) değerleri, dalga boyu (λ), dalga boyu ile dalga yayılım uzunluğu arasındaki ilişki (L) ve yakın alan (N) verileri, tahribatsız test örneklerinin L, R ve T yönleri için ayrı ayrı belirlenmiştir.

3.4.1. Ultrasonik Dalga Hızı

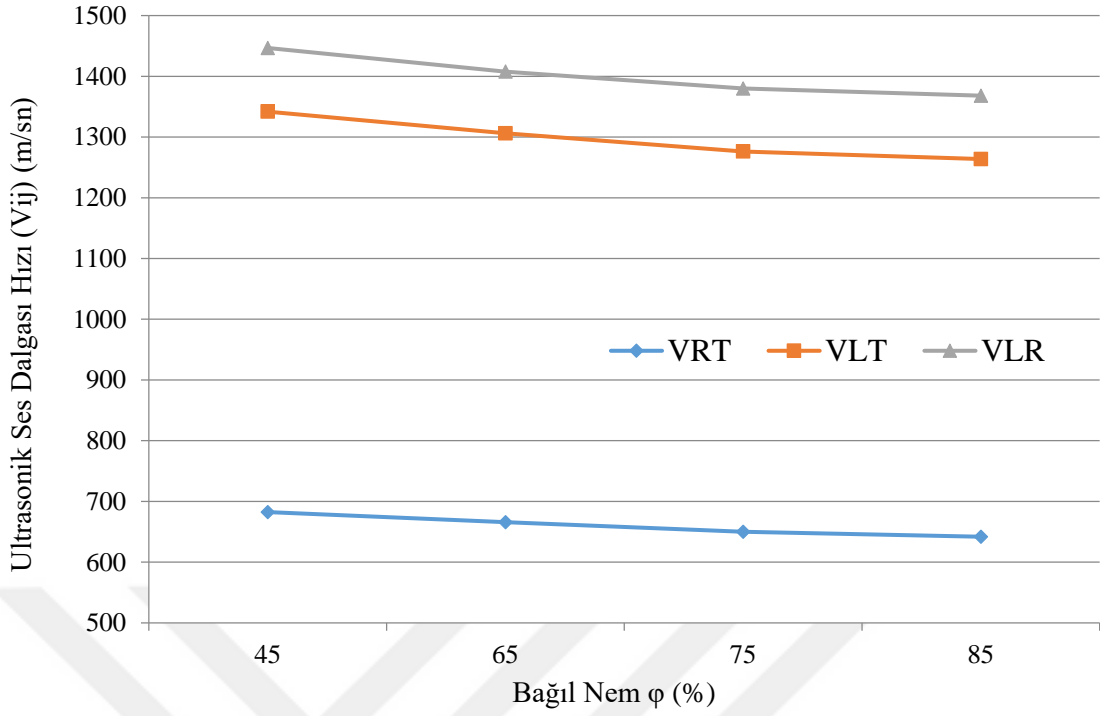
Ultrasonik boyuna dalga, 20°C sıcaklıktaki suda 1480m/sn, 302 çeliğinde 5660m/sn, alüminyumda 6320m/sn ve demirde 5900m/sn hızla ilerler. Ultrasonik kesme dalgası ise 302 çeliğinde 3120m/sn, alüminyumda 3130m/sn ve demirde 3230m/sn hızla ilerler [453]. Ultrasonik dalganın havadaki hızı ise yaklaşık 330m/sn olarak belirtilmektedir [454]. Fakat sadece çok yüksek genlikli ve çok düşük frekanslı ultrasonik dalgalar, havada (300m/sn hız ile) yayılabilir ve havanın akustik empedansı sıfırdır [455]. Dolayısı ile ultrasonik dalga hızları, katı, sıvı ve gazlarda farklıdır. Sıvılardaki ses hızı gazlardan yüksek, katılardan düşüktür fakat Cansu [123]'nun belirttiği üzere enine ultrases dalgaları, atomları veya molekülleri arasındaki (mesafenin fazla olması sonucu aralarındaki çekme kuvvetinin yetersizliğinden kaynaklanan) bağların zayıf olmasından dolayı sıvı ve gazlarda yayılamazlar. Çünkü enine dalgalar, yayılım yaptıkları malzemenin parçacıklarını çapraz yönde kaymaya zorlayan özellikleri nedeniyle sadece katılarda yayılabilirler [456]. Katılarda ise moleküllerin birbirine çok yakın olması, sesin daha hızlı iletilmesine neden olmaktadır. Bu bakış açısı ile katıların yapısı ses hızını belirleyen temel etkenlerdendir ve kusur, yoğunluk, homojenlik, tekdüzelik gibi malzeme kalitesini ortaya koyan parametreler ne kadar iyi ise malzemede ilerleyen ses dalgasının hızı da o kadar yüksek olması beklenir. Ağaç malzemede bu durum diğer katılar gibi basit bir şekilde açıklanamamaktadır. Zira aynı tür odun olsa bile yetiştirme koşullarına bağlı olarak odun yapısında farklılıklar olabilmektedir. İzotropik yapıya sahip malzemeden farklı olarak ortotropik yapıya sahip odunda ultrasonik ses hızı yönlere bağlı olarak da değişmektedir. Bu durum Şekil 3.27'de açıkça görülmektedir. Zira kızılçam odunu dinamik test örneklerinin tüm düzlemlerdeki ultrasonik kesme dalgası hızları birbirinden farklıdır. Ayrıca rutubet içeriğinin artışının hız üzerine ters etkisi olduğu da görülmektedir.

Kızılçam odunu dinamik test örneklerinin bağıl nem gruplarına göre ortalama kesme dalgası hızları ve varyasyon katsayıları, duncan homojenlik grubu, yoğunluk ve rutubet içeriği verileri, Çizelge 3.65'de görülmektedir. Buna göre %65, 75 ve 85 bağıl nemde meydana gelen kesme dalgası hızı azalışı, sırası ile V_{LR} 'de %2,8, 4,8 ve 5,7, V_{LT} 'de %2,7, 5,1 ve 6,2 ve V_{RT} 'de %2,5, 5 ve 6,3 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.65. Kızılçam odunu V_{LR} , V_{LT} ve V_{RT} 'sinin bulguları.

φ (%)		N	V_{LR} (m/sn)	HG LR	V_{LT} (m/sn)	HG LT	V_{RT} (m/sn)	HG RT
45	\bar{x}	20	1446,55	3	1341,81	3	682,41	3
	V(%)		3,14		3,83		3,12	
	d(gr/cm ³)		0,545		0,545		0,545	
	ω (%)		8,16		8,16		8,16	
65	\bar{x}	20	1407,76	2	1306,09	2	665,78	2-3
	V(%)		4,40		2,92		4,37	
	d(gr/cm ³)		0,558		0,558		0,558	
	ω (%)		12,66		12,66		12,66	
75	\bar{x}	20	1379,87	1-2	1276,24	1	649,97	1-2
	V(%)		3,14		2,59		4,12	
	d(gr/cm ³)		6,38		4,94		8,08	
	ω (%)		0,567		0,567		0,567	
85	\bar{x}	20	1368,06	1	1263,67	1	641,78	1
	V(%)		3,32		2,52		5,12	
	d(gr/cm ³)		0,569		0,569		0,569	
	ω (%)		17,91		17,91		17,91	

V(%): Varyasyon katsayısı, ω (%): Rutubet seviyesi, φ (%): Bağıl nem, N: Örnek sayısı, L: Lif yönü, R: Radyal yön, T: Teğet yön, HG: Homojenlik Grubu, \bar{x} : Ortalama, d: Yoğunluk.



Şekil 3.27. Kızılçam odununun dalga hızları ve bağıl neme göre değişimi.

Çizelge 3.66'daki varyans analizi sonucunda kızılçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme dalgası hızında rutubet artışı ile meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.66. Kızılçam odunu V_{LR} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	73027,928a	3	24342,643	9,403	,000
Intercept	156926865,651	1	156926865,651	60619,298	,000
RH	73027,928	3	24342,643	9,403	,000
Error	196743,318	76	2588,728		
Total	157196636,898	80			
Corrected Total	269771,246	79			

a. R Squared = ,271 (Adjusted R Squared = ,242)

Duncan testi sonucunda kızılçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme dalgası hızı, Çizelge 3.67'de görüldüğü üzere üç farklı homojenlik grubu oluşturmuştur. Buna göre %45, 65 ve 85 bağıl nemdeki kesme dalgası hızları, ayrı grupta yer alırken %75 bağıl nemdeki kesme dalgası hızı, hem bir hem de ikinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.67. Kızılçam odunu V_{LR} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	1368,0680		
75	20	1379,8735	1379,8735	
65	20		1407,7655	
45	20			1446,5580
Sig.		,465	,087	1,000

Çizelge 3.68'deki varyans analizi sonucunda kızılçam odunu dinamik test örneklerinin LT düzlemindeki kesme dalgası hızında rutubet artışı ile meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.68. Kızılçam odunu V_{LT} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	72642,709a	3	24214,236	14,810	,000
Intercept	134567278,006	1	134567278,006	82306,683	,000
RH	72642,709	3	24214,236	14,810	,000
Error	124256,170	76	1634,950		
Total	134764176,884	80			
Corrected Total	196898,878	79			
a. R Squared = ,369 (Adjusted R Squared = ,344)					

Örnek gruplarının varyanslarının homojen olması nedeniyle Post-Hoc testi olarak Duncan çoklu aralık (açıklık) testi uygulanmıştır. Duncan testi sonucunda kızılçam odunu dinamik test örneklerinin LT düzlemindeki kesme dalgası hızı için, Çizelge 3.69'da görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %75 ve 85 bağıl nemdeki kesme dalgası hızları, birinci grupta yer alırken %65 bağıl nemdeki kesme dalgası hızı, ikinci grupta ve %45 bağıl nemdeki kesme dalgası hızı üçüncü grupta yer almıştır.

Çizelge 3.69. Kızılçam odunu V_{LT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	1263,6720		
75	20	1276,2450		
65	20		1306,0905	
45	20			1341,8105
Sig.		,329	1,000	1,000

Çizelge 3.70'deki varyans analizi sonucunda kızılçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme dalgası hızında rutubet artışı ile meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.70. Kızılçam odunu V_{RT} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	19369,595a	3	6456,532	7,925	,000
Intercept	34846798,810	1	34846798,810	42772,129	,000
RH	19369,595	3	6456,532	7,925	,000
a. R Squared = ,238 (Adjusted R Squared = ,208)					

Duncan testi sonucunda kızılçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme dalgası hızı, Çizelge 3.71'de görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu oluşturmuştur. Buna göre %45 ve 85 bağıl nemdeki kesme dalgası hızları, ayrı grupta yer alırken %65 bağıl nemdeki kesme dalgası hızı, %45 bağıl nemdeki hız ile ve %75 bağıl nemdeki kesme dalgası hızı da %85 bağıl nemdeki hız ile aynı grupta yer almıştır.

Çizelge 3.71. Kızılçam odunu V_{RT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

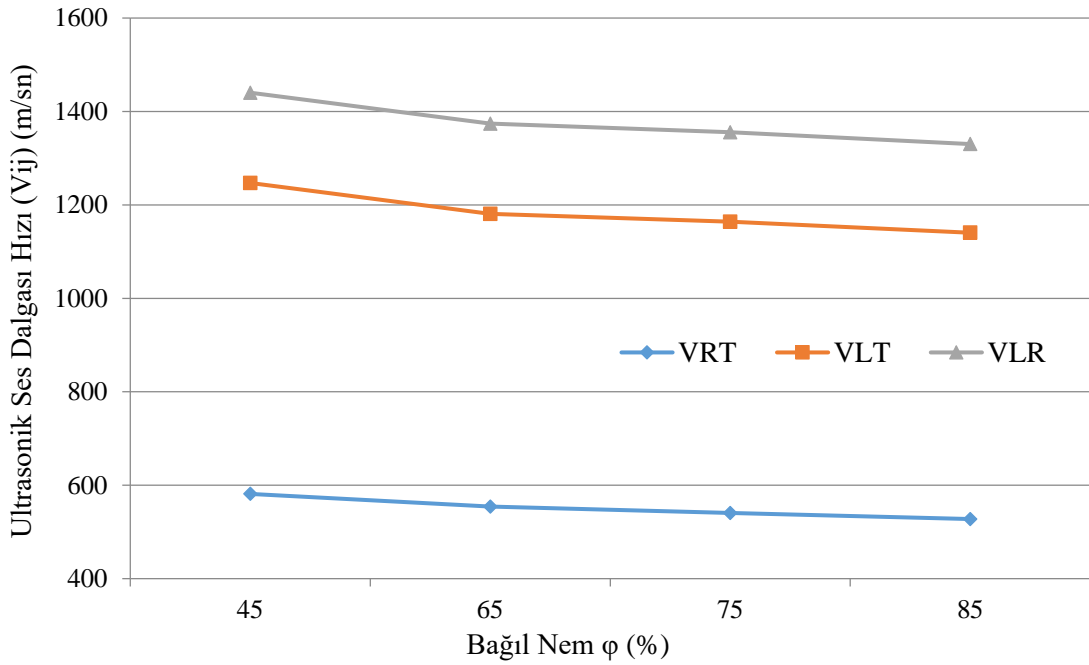
Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	641,7815		
75	20	649,9695	649,9695	
65	20		665,7880	665,7880
45	20			682,4155
Sig.		,367	,084	,069

Karaçam odunu dinamik test örneklerinin bağıl nem gruplarına göre ortalama kesme dalgası hızları ve varyasyon katsayıları, duncan grubu, yoğunluk ve rutubet içeriği verileri, Çizelge 3.72’de görülmektedir. Buna göre %65, 75 ve 85 bağıl nemde meydana gelen kesme dalgası hızı azalışı, sırası ile V_{LR} ’de %4,8, 6,3 ve 8,3, V_{LT} ’de %5,6, 7,1 ve 9,3 ve V_{RT} ’de %4,9, 7,6 ve 10,2 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.72. Karaçam odunu V_{LR} , V_{LT} ve V_{RT} ’sinin bulguları.

$\varphi(\%)$		N	V_{LR} (m/sn)	HG LR	V_{LT} (m/sn)	HG LT	V_{RT} (m/sn)	HG RT
45	\bar{x}	20	1440,24	3	1246,92	3	581,39	3
	V(%)		2,79		3,69		4,83	
	d(gr/cm ³)		0,520		0,520		0,520	
	$\omega(\%)$		7,93		7,93		7,93	
65	\bar{x}	20	1374,15	2	1180,91	2	554,13	2
	V(%)		4,74		2,62		4,85	
	d(gr/cm ³)		0,541		0,541		0,541	
	$\omega(\%)$		12,4		12,4		12,4	
75	\bar{x}	20	1355,51	1-2	1164,10	1-2	540,56	1-2
	V(%)		3,59		3,39		5,23	
	d(gr/cm ³)		0,552		0,552		0,552	
	$\omega(\%)$		14,69		14,69		14,69	
85	\bar{x}	20	1330,44	1	1140,60	1	527,47	1
	V(%)		3,54		3,46		5,04	
	d(gr/cm ³)		0,570		0,570		0,570	
	$\omega(\%)$		16,51		16,51		16,51	

V(%):Varyasyon katsayısı, $\omega(\%)$:Rutubet seviyesi, $\varphi(\%)$: Bağıl nem, N: Örnek sayısı, L: Lif yönü, R: Radyal yön, T: Teğet yön, HG: Homojenlik Grubu, \bar{x} : Ortalama, d:Yoğunluk.



Şekil 3.28. Karaçam odununun dalga hızları ve bağıl neme göre değişimi.

Şekil 3.28’de görüldüğü üzere karaçam odunu dinamik test örneklerinin ultrasonik kesme dalga hızları, tüm düzlemlerde rutubet içeriğinin artışı ile düşmüştür.

Çizelge 3.73’deki varyans analizi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme dalgası hızında rutubet artışı ile meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.73. Karaçam odunu V_{LR} ’sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	132457,652a	3	44152,551	16,066	,000
Intercept	151269498,128	1	151269498,128	55044,852	,000
RH	132457,652	3	44152,551	16,066	,000
Error	208856,622	76	2748,113		
Total	151610812,402	80			

a. R Squared = ,388 (Adjusted R Squared = ,364)

Duncan testi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme dalga hızları, Çizelge 3.74’de görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu oluşturmuştur. Buna göre %45, 65 ve 85 bağıl nemdeki kesme dalgası hızları, ayrı grupta yer alırken %75 bağıl nemdeki kesme dalgası hızı, hem bir hem de ikinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.74. Karaçam odunu V_{LR} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	1330,4445		
75	20	1355,5125	1355,5125	
65	20		1374,1500	
45	20			1440,2475
Sig.		,135	,264	1,000

Çizelge 3.75'deki varyans analizi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin LT düzlemindeki kesme dalgası hızında rutubet artışı ile meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.75. Karaçam odunu V_{LT} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	124914,364a	3	41638,121	25,580	,000
Intercept	111985194,838	1	111985194,838	68797,443	,000
RH	124914,364	3	41638,121	25,580	,000
a. R Squared = ,502 (Adjusted R Squared = ,483)					

Duncan testi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme dalga hızları, Çizelge 3.76'da görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu oluşturmuştur. Buna göre %45, 65 ve 85 bağıl nemdeki kesme dalgası hızları, ayrı grupta yer alırken %75 bağıl nemdeki kesme dalgası hızı, hem %65 hem de %85 bağıl nem ile aynı grupta yer almıştır.

Çizelge 3.76. Karaçam odunu V_{LT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	1140,6020		
75	20	1164,1035	1164,1035	
65	20		1180,9175	
45	20			1246,9280
Sig.		,069	,192	1,000

Çizelge 3.77’deki varyans analizi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme dalgası hızında rutubet artışı ile meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.77. Karaçam odunu V_{RT} ’sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	31923,449a	3	10641,150	13,408	,000
Intercept	24278515,582	1	24278515,582	30591,906	,000
RH	31923,449	3	10641,150	13,408	,000
Error	60315,535	76	793,625		
Total	24370754,566	80			
Corrected Total	92238,984	79			
a. R Squared = ,346 (Adjusted R Squared = ,320)					

Duncan testi sonucunda karaçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme dalga hızları, Çizelge 3.78’de görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu oluşturmuştur. Buna göre %45, 65 ve 85 bağıl nemdeki kesme dalgası hızları, ayrı grupta yer alırken %75 bağıl nemdeki kesme dalgası hızı, hem %65 hem de %85 bağıl nem ile aynı grupta yer almıştır.

Çizelge 3.78. Karaçam odunu V_{RT} ’sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	527,4755		
75	20	540,5610	540,5610	
65	20		554,1315	
45	20			581,3980
Sig.		,146	,132	1,000

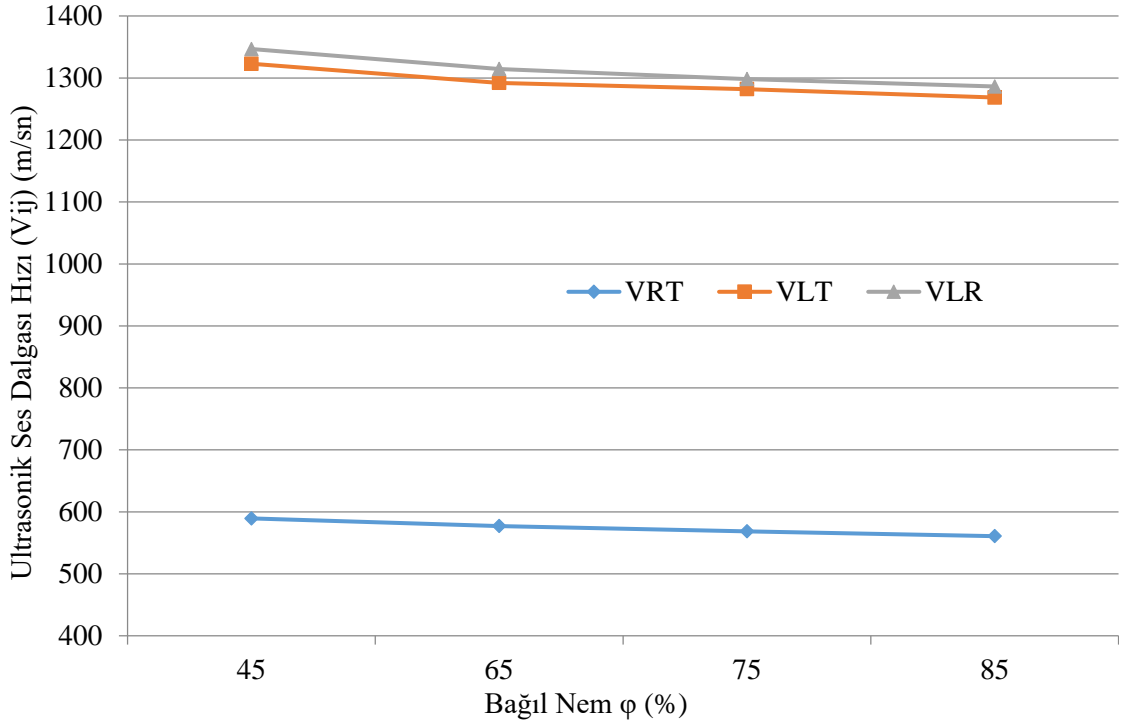
Sarıçam odunu dinamik test örneklerinin bağıl nem gruplarına göre ortalama kesme dalgası hızları ve varyasyon katsayıları, duncan grubu, yoğunluk ve rutubet içeriği verileri, Çizelge 3.79’da görülmektedir. Buna göre %65, 75 ve 85 bağıl nemde meydana gelen kesme dalgası hızı azalışı, sırası ile V_{LR} ’de %2,4, 3,7 ve 4,7, V_{LT} ’de %2,4, 3,2 ve 4,3 ve V_{RT} ’de %2,1, 3,7 ve 5,1 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.79. Sarıçam odunu V_{LR} , V_{LT} ve V_{RT} 'sinin bulguları.

$\varphi(\%)$		N	V_{LR} (m/sn)	HG LR	V_{LT} (m/sn)	HG LT	V_{RT} (m/sn)	HG RT
45	\bar{x}	20	1346,76	2	1322,91	2	589,40	3
	V(%)		5,92		2,65		4,09	
	d(gr/cm ³)		0,546		0,546		0,546	
	$\omega(\%)$		7,94		7,94		7,94	
65	\bar{x}	20	1314,62	1-2	1292,17	1	577,16	2-3
	V(%)		2,66		2,82		2,54	
	d(gr/cm ³)		0,552		0,552		0,552	
	$\omega(\%)$		13,04		13,04		13,04	
75	\bar{x}	20	1298,37	1	1282,03	1	568,54	1-2
	V(%)		3,39		4,02		3,66	
	d(gr/cm ³)		0,557		0,557		0,557	
	$\omega(\%)$		14,34		14,34		14,34	
85	\bar{x}	20	1286,34	1	1268,51	1	560,80	1
	V(%)		4,23		4,20		4,36	
	d(gr/cm ³)		0,560		0,560		0,560	
	$\omega(\%)$		16,37		16,37		16,37	

V(%):Varyasyon katsayısı, $\omega(\%)$:Rutubet seviyesi, $\varphi(\%)$: Bağlı nem, N: Örnek sayısı, L: Lif yönü, R: Radyal yön, T: Teğet yön, HG: Homojenlik Grubu, \bar{x} : Ortalama, d: Yoğunluk.

Sarıçam odunu dinamik test örneklerinin ultrasonik kesme dalgası hızları, rutubet içeriğinin artışı ile düşmüştür. Şekil 3.29'de görüldüğü üzere hız düşüşü, tüm düzlemlerde gözlemlenmiştir.



Şekil 3.29. Sarıçam odununun dalga hızları ve bağıl neme göre değişimi.

Çizelge 3.80'deki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme dalgası hızında rutubet artışı ile meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.80. Sarıçam odunu V_{LR} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	41164,861a	3	13721,620	4,181	,009
Intercept	137607878,511	1	137607878,511	41924,538	,000
RH	41164,861	3	13721,620	4,181	,009
Error	249452,928	76	3282,275		
Total	137898496,300	80			
Corrected Total	290617,789	79			

a. R Squared = ,142 (Adjusted R Squared = ,108)

Duncan testi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin LR düzlemindeki kesme dalga hızları için, Çizelge 3.81'de görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 bağıl nemdeki kesme dalgası, hızı ikinci, %75 ve 85 bağıl nemdeki kesme dalgası hızları, birinci grupta yer almıştır. %65 bağıl nemdeki kesme dalgası hızı, hem bir hem de ikinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.81. Sarıçam odunu V_{LR} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	1286,3475	
75	20	1298,3705	
65	20	1314,6200	1314,6200
45	20		1346,7630
Sig.		,145	,080

Çizelge 3.82'deki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin LT düzlemindeki kesme dalgası hızında rutubet artışı ile meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.82. Sarıçam odunu V_{LT} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	32107,136a	3	10702,379	5,058	,003
Intercept	133419079,735	1	133419079,735	63052,281	,000
RH	32107,136	3	10702,379	5,058	,003
Error	160816,547	76	2116,007		
a. R Squared = ,166 (Adjusted R Squared = ,134)					

Duncan testi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin LT düzlemindeki kesme dalga hızları için, Çizelge 3.83'de görüldüğü üzere iki farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 bağıl nemdeki kesme dalgası, hızı ikinci, diğerleri birinci grupta yer almıştır.

Çizelge 3.83. Sarıçam odunu V_{LT} 'sinin bağıl nem göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset	
		1	2
85	20	1268,5110	
75	20	1282,0345	
65	20	1292,1785	
45	20		1322,9140
Sig.		,129	1,000

Çizelge 3.84'deki varyans analizi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme dalgası hızında rutubet artışı ile meydana gelen düşmenin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) görülmüştür.

Çizelge 3.84. Sarıçam odunu V_{RT} 'sinin varyans analizi.

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	9022,468a	3	3007,489	6,260	,001
Intercept	26356128,436	1	26356128,436	54858,269	,000
RH	9022,468	3	3007,489	6,260	,001
Error	36513,470	76	480,440		
Total	26401664,374	80			
Corrected Total	45535,938	79			
a. R Squared = ,198 (Adjusted R Squared = ,166)					

Duncan testi sonucunda sarıçam odunu dinamik test örneklerinin RT düzlemindeki kesme dalga hızları için, Çizelge 3.85'de görüldüğü üzere üç farklı homojenlik gurubu ortaya çıkmıştır. Buna göre %45 ve 85 bağıl nemdeki kesme dalgası hızları, ayrı grupta yer alırken %65 ve 75 bağıl nemdeki kesme dalgası hızları, sırası ile ikinci ve üçüncü ve birinci ve ikinci grupta yer almıştır.

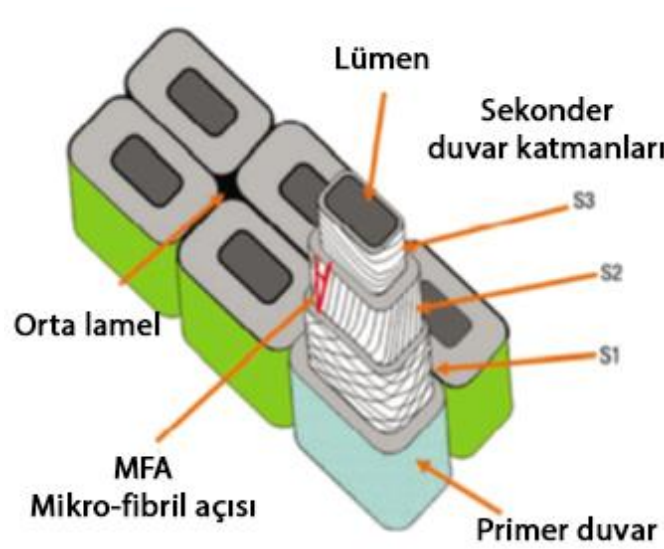
Çizelge 3.85. Sarıçam odunu V_{RT} 'sinin bağıl neme göre homojenlik grupları.

Bağıl Nem (%)	Örnek Sayısı	Subset		
		1	2	3
85	20	560,8055		
75	20	568,5435	568,5435	
65	20		577,1630	577,1630
45	20			589,4030
Sig.		,268	,217	,081

Bucur ve Rasolofosaon [457] çam odunun kesme dalgası hızını LR, LT, RT, RL, TL ve TR düzlemlerinde sırasıyla 1326, 1199, 650, 1355, 1118 ve 685m/sn olarak belirlemiştir. Yazarlar odunun olağanüstü derecede anizotropik yapıya fakat zayıf bir doğrusal olmayan tepkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada kızılçam, karaçam ve sarıçam odunlarının kesme dalgası hızları %65 bağıl nemde LR, LT ve RT düzlemleri

için sırası ile 1408, 1306 ve 666m/sn, 1374, 1181 ve 554m/sn ve 1315, 1292 ve 577m/sn olarak belirlenmiştir. Bu anlamda elde edilen kesme dalgası hızları literatür ile uyumluluk göstermektedir.

Hasegawa ve Matsumura [458]'ya göre ses hızı ile rutubet içeriği ters ilişkilidir. Bu çalışmada %45 bağıl nemde elde edilen Sarıçam odununun RT, LT ve LR yönlerindeki kesme dalgası hızları sırası ile %65 bağıl nemde %2,12, 2,38 ve 2,44, %75 bağıl nemde %3,67, 3,19 ve 3,73 ve %85 bağıl nemde %5,1, 4,29 ve 4,7 düşmüştür. Kısacası ses hızı, rutubet içeriğinin artması ile düşmüştür. Fakat ultrasonik ses hızı Leighton [273]'un belirttiği üzere havada (343m/sn) suya (1497m/sn) oranla çok daha düşüktür ve Zhu vd. [459] çimento hamuru (karışımı) içerisindeki hava boşluklarının ultrasonik boyuna ve kesme dalgaların ilerlemesine etkisini incelemiş ve hava boşluklarının boyuna dalga hızını kayda değer oranda düşürdüğünü fakat enine dalga hızına az etki ettiğini belirtmiştir. Ayrıca enine dalgaların su gibi ortamlarda yayılım yapamadığı da bilindiğine göre rutubet içeriğinin artması, Şekil 3.30'da görülen odun hücrelerindeki havayla dolu olan boşlukların bir miktar suyla dolması ölçümlerdeki elde edilen kesme dalgası hızının düşüşünü anlamlı hale getirmektedir. Ölçümlerde boyuna dalga kullanılıyor olsaydı ses hızında bir artış olabileceği düşünülebilirdi fakat literatürde boyuna dalga hızlarının da rutubet içeriği artışı ile düştüğü belirtilmiştir. Bu durumda ultrasonik dalga hızının sıvı, hava ve katı ortamda ilerleyişinin etkileşimli bir sonucu değiştiği söylenebilir. Dolayısıyla sesin abzorbe olma oranının, odunun rutubet içeriğinin artışı ile katıda iletilmesi esnasında arttığı söylenebilir.



Şekil 3.30. Odunun hücre yapısı [460].

Kızılcım odununun %45 bağıl nemde RT, LT ve LR yönlerindeki kesme dalgası hızları, sırası ile %65 bağıl nemde %2,5, 2,74 ve 2,76, %75 bağıl nemde %5, 5,14 ve 4,83 ve %85 bağıl nemde %6,33, 6,18 ve 5,74 düşmüştür.

Rutubet içeriğine bağlı olarak en yüksek ses hızı düşüşü karaçam odununda meydana gelmiştir. Karaçam odununun %45 bağıl nemde RT, LT ve LR yönlerindeki kesme dalgası hızları, sırası ile %65 bağıl nemde %4,92, 5,59 ve 4,81, %75 bağıl nemde %7,56, 7,12 ve 6,25 ve %85 bağıl nemde %10,23, 9,32 ve 8,25 düşmüştür.

Buna göre RT, LT ve LR düzlemlerindeki kesme dalgası hızlarında en az düşüş sarıçam odununda hesaplanmıştır. Odun, içi oyuk borumsu hücrelerden oluşur ve bunların şekli ve teşekkülü odunun anizotropisine ve mekanik özelliklerine ciddi etki eder [425]. Bu durumun ses hızlarındaki farklılaşmalara neden olduğu düşünülebilir.

Yumuşak ağaçlar, %90'dan fazla eksenel hücrelerden oluşmaktadır ve bunlardan biri olan traheidler, lif doğrultusunda uzanmaktadır. Traheidler, odunun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler [461]. Bunların boy-en oranının çok yüksek olması da L yönündeki dalga hızının çok yüksek olmasına neden olabilir. Ne kadar uzun lif boyu o kadar yüksek ses hızı demektir. Bu durum L yönündeki elastik malzeme ve kristallığın devamlılığı sonucudur [288]. Halabe vd. [229]'ne göre T ve R doğrultularındaki hızlar, L doğrultusundakinin yaklaşık %30-40'ı kadardır. Bu çalışmada elde edilen ses hızlarına bakıldığında lif doğrultusundaki hızın diğer yönlerden 2/3 kat daha hızlı olduğu ve bu anlamda literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

Katı ortotropik malzemelerin kristal teorisi, enine dalgalar için $c_{LR}=c_{RL}$; $c_{LT}=c_{TL}$; $c_{TR}=c_{RT}$ bağıntısını geçerli kılmaktadır fakat bu durum odun için tam olarak aynı değildir çünkü odun organik ve daha kompleks bir yapıya sahiptir [186]. Bu çalışmada elde edilen kızılcım %85 bağıl nemdeki $V_{LR}\approx V_{RL}$ ve karaçam %75 bağıl nemdeki $V_{LT}\approx V_{TL}$ değerleri haricinde tüm türlerin tüm bağıl nemlerdeki hız değerleri farklı oranlara değişkenlik göstererek literatür ile uyumlu olmuştur.

Ultrasonik dalga hızının rutubet içeriği ile ters ilişkiye sahip olduğu [296] ve odundaki rutubet içeriğinin ultrasonik ses hızını büyük oranda etkilediği belirtilmiştir [285], [287], [462]. Rutubet içeriğinin dalga yayılım hızına etkisi göz önüne alındığında, farklı rutubetlerde elde edilen hızların homojenize edilmesi için Gonçalves vd. [296] düzeltme faktörünün dikkate alınması gerektiğini belirtmiş ve ultrasonik hız değerlerinin (V_H) %12 rutubet içeriği değerindeki hızını (V_{12}) tahmin etmek için düzeltme faktörünü (k_H)

içeren genel bir model ortaya koymuştur. Buradaki hız değişimi oranı, rutubet içeriğinin herbir %1'lik değişimini yansıtmaktadır. Buna göre bu model LDN altında denklem (3.1) ile ifade edilirken LDN üstünde denklem (3.2) ile ifade edilmektedir.

$$V_{12} = V_H / (1 - k_H (MC-12)) \quad (3.1)$$

$$V_{12} = V_H / (k_1 - k_2 (MC-LDN)) \quad (3.2)$$

Burada; V_{12} denge rutubetindeki (%12MC) hızı, MC malzemenin ölçülen rutubet miktarını, V_H LDN altı ya da üstündeki rutubet içeriğinde ölçülen ultrasonik dalga hızını ve k_H , k_1 ve k_2 regresyon modeli ile elde edilen düzeltme faktörlerini ifade etmektedir.

Bunun yanında farklı ağaç türleri ve rutubet içeriği ile elde edilen ultrasonik dalga hızlarının, referans boyuna (Longitudinal) dalga hızına düzeltilmesi için kullanılacak çeşitli eşitlikler de önerilmiştir. Sandoz [463], [464] ve Steiger ve Arnold [465] göknar ve ladin odunu rutubet içeriğinin %5 ve %28 arasında olması durumunda denklem (3.3)'ün, %28'den fazla olması durumunda (3.4)'ün kullanılarak ses hızının düzeltilmesi gerektiğini belirtmiştir. Unterwieser ve Schickhofer [447] ve Montero [466] %12 ve %28 arasında rutubet içeriğine sahip sarıçam ve ladin odunu için denklem (3.5)'in kullanılmasını önermiştir. Unterwieser ve Schickhofer [447] Ladin odunu rutubet içeriğinin %28'den fazla olması durumunda ise denklem (3.6)'yı önermiştir. Íñiguez-González vd. [467] %5 ve 30 arasında rutubet içeriğine sahip odundan elde edilen hızın, %12 rutubet içeriğine göre düzeltilmesi için denklem (3.7)'yi önermiştir. Brezilya Ulusal Standardı'na göre %12 ve %30 arası rutubet içeriğine sahip tropik türlerin hız dönüşümlerinde ise denklem (3.8) kullanılabilir [468].

$$V_{12} = V_H / (1 - 0,053 (MC-12)) \quad (3.3)$$

$$V_{12} = V_H / (0,9152 - 0,00036 (MC-28)) \quad (3.4)$$

$$V_{12} = V_H / (1 - 0,0060 (MC-12)) \quad (3.5)$$

$$V_{12} = V_H / (0,902 - 0,0017 (MC-28)) \quad (3.6)$$

$$V_{12} = V_H / (1 - 0,01 (MC-12)) \quad (3.7)$$

$$V_{sat} = -1745 + V_H + 16 \times MC + \rho_{ap} \quad (3.8)$$

Burada; V_{12} denge rutubetindeki (%12MC) hızı, MC malzemenin ölçülen rutubet

miktarını, V_H LDN altı ya da üstündeki rutubet içeriğinde ölçülen ultrasonik dalga hızını, ρ_{ap} denge rutubetindeki odun yoğunluğunu ve V_{sat} saturasyon noktasında ölçülen ultrasonik dalga hızını ifade etmektedir.

Denklemlerde görüldüğü üzere düzeltme faktörleri, türlere ve çalışmadan çalışmaya farklılık göstermektedir. Bunun yanında LDN altındaki rutubet içeriğinde düzeltme faktörünün V_{12} 'nin olduğundan fazla hesaplanmasına neden olduğunu ve LDN üstündeki rutubet içeriğinde ise yoğunluk ile V_{12} 'nin yaklaşık %10-30 arasında arttığı belirtilmiştir [296]. Benzer şekilde NBR15521 [468]'de önerilen eşitliğin kullanılarak V_{sat} 'ın belirlenmesi ise odun özelliklerinin olduğundan düşük hesaplanmasına neden olabileceği belirtilmiştir. Dolayısı ile bu çalışmada herhangi bir düzeltme faktörü kullanılmamıştır.

Arriaga vd. [469] 22kHz ile gerçekleştirdiği ölçümler ile uzunluğun dalga uçuş süresine (DUS, Time of Flight-TOF) ya da dalga hızına etkisinin enine kesitten daha fazla olduğunu belirtmiştir. Bucur [470]'a göre boy en oranının 20-40 arasında olması durumunda boyuna dalga hızı neredeyse sabittir. Bu çalışmada kullanılan test örneklerinin en boy oranı her ölçüm doğrultusu için yaklaşık 2,5 olarak hesaplanmıştır. Fakat Şekil 2.9'da görüldüğü üzere 45°'lik kesimler sonucu oluşan yamuk (trapezoid) ve düzgün sekizgen (oktagon) yüzeylerden dolayı en-boy oranını hesaplamak ölçüm yapılan doğrultuya bağlı olarak karmaşıklaşmaktadır. Dolayısı ile örnek geometrisi küp olmadığı için tam anlamı ile bir karşılaştırma yapmak doğru olmayabilir.

Acuna vd. [471] beş farklı türde boyuna akustik dalga hızları üzerine çalışmıştır. Arriaga vd. [472] Sylvatest Duo ile gerçekleştirdikleri ölçümler sonucunda İspanyol sarıçamı ve karaçamı (*Iaricio pine* ve *Pinus nigra* Arn.) yapısal keresteleri için bazı düzeltme faktörleri önermiştir. Sarıçam ve karaçam için önerilen bu faktörler, bu çalışmada kesme dalgası kullanıldığı için geçerli değildir.

Bartholomeu [473] dalga yayılımıyla eğilme testi sonucu elde edilen parametreler (V_{LL} , C_{LL} ve E_M) arasındaki ilişkiyi taze hal ve denge rutubeti içeriğinde incelemiştir. Denge rutubetindeki sert ağaçlar (*Goupia glabra* and *Eucalyptus citriodora*) ile gerçekleştirilen eğilme testi sonucu elde edilen veriler ile taze halde elde edilen ultrasonik test verileri daha iyi ilişki göstermişken yumuşak ağaçtan (*Pinus elliottii*) elde edilen veriler tüm rutubet değerlerinde aynı olmuştur. Waubke [474], [475] dalga yayılım yöntemi ile elde ettiği parametreler (V_{LL} ve C_{LL}) ile eğilme testi ile elde ettiği parametreler (E_M ve f_m)

arasındaki ilişki katsayılarının davranışını rutubet içeriğine bağlı olarak değerlendirmiştir. Waubke [474] ve Estevez ve Sanchez [476] en iyi ilişki katsayısının taze hal değerlerinde elde edildiğini, en kötü ilişkinin ise denge rutubeti içeriğinde elde edildiğini belirtmiştir. Waubke [475] testlerin denge rutubetinde yapılması durumunda dalga hızı ile elastikiyet modülü arasındaki ilişkinin, LDN ve %20 rutubet içeriği durumunda yapılmasından daha iyi sonuç verdiğini belirtmiştir. Waubke'nin iki testi arasındaki karşıt sonuçlar, Gonçaves vd. [296]'ne göre parçaların farklı boyutlarından dolayı meydana gelen rutubet değişimi ile alakalı olabilir. Bu çalışmada statik kesme modülü ile dinamik kesme modülü verileri, eşleştirme yöntemi ile hazırlanmış örneklerden elde edilmiştir. Statik ile dinamik test verileri arasındaki en iyi ilişki Şekil 3.12'de görüldüğü üzere ($R^2:0,9682$) kızılçam odununun %45 bağıl nemdeki G_{RT} 'sinde elde edilmişken en zayıf ilişki Şekil 3.20'de görüldüğü üzere ($R^2:0,6769$) sarıçam odununun %65 bağıl nemdeki G_{LR} 'sinde elde edilmiştir.

Bucur ve Archer [238], Keunecke vd. [320] ve Ivkovic vd. [477] odunun elastik sabitlerinin ultrasonik ses hızını büyük oranda etkilediğini belirtmiştir. Hori vd. [478] ses hızının doğrudan spesifik elastikiyet modülüne (E/ρ) bağlı olduğunu belirtmiştir. Bu bakış açısı ile Baar vd. [260] yoğunluk artışının ses hızını düşürebileceğini belirtmiştir. Yoğunluktaki artış genellikle odun katılığının artışına da sebep olur. Fakat (içiçe geçmiş lifler, anatomik elementlerin uzunluğu, MFA gibi sebeplerden dolayı) yoğunluk artışı katılık artışını da beraberinde getirmediğinde artan yoğunlukla ses hızı düşer. Dolayısı ile yoğunluğun ses hızına doğrudan etkisini tesis etmek zordur. Fakat Bucur ve Chivers [431], Mishiro [433], Oliveira ve Sales [302] odun yoğunluğunun ultrasonik ses hızını büyük oranda etkilediğini belirtmiştir.

DeVallance [277]'a göre yüksek iletim hızları, genellikle daha sağlam malzemeleri temsil eder. Lin ve Wu [301] odundaki budak boyutu arttığında ultrasonik dalga iletim süresinin azaldığını ve hızın arttığını belirtmiştir. Halbuki budak varlığı daha sağlam ve kaliteli odundan ziyade kusurlu bir malzemeye ifade eder. Buradaki hız artışı budağın daha homojen ve yoğun bir yapıya sahip olmasına bağlanabilir fakat odun içerisinde oluşturduğu süreksizlik nedeni ile dalga iletim yolunu uzatacağı ve dolayısı ile hızı düşürebileceği düşünülebilir. Zira sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) odununda parça boyu ve budaklılığın ultrasonik ölçümlere etkisi İñiguez vd. [254] tarafından incelenmiş ve parça boyundaki her bir metre artışın budaksız odunda 68 m/sn budaklı odunda ise 83 m/sn'lik bir hız düşüşüne neden olduğu belirtilmiştir. Bucur ve Chivers [431] yoğunluğun

yükselmesinin dalga yayılım hızının düşmesine neden olduğunu belirtirken Oliveira vd. [285] buna karşıt bir davranış gözlemlemiştir. Mishiro [433] ve Ilic [434] ise yoğunluğun dalga yayılım hızına etkisi olmadığını belirtmiştir. Baar vd. [260] ise yoğunluğun olumlu etkisi olduğunu fakat bunun malzemenin makro ve mikro yapısı gibi etkenler tarafından bastırıldığını belirtmiştir. Nihayetinde literatürde karşıt ve nötür görüşler de mevcuttur. Bu çalışmada örnekler budaksız olduğu için yoğunluk artışı odunun kondisyonlanması sonucu meydana gelen rutubet içeriği artışı ile alakalıdır. Dolayısı ile yoğunluğun ses hızı üzerindeki etkisi rutubet içeriği ile etkileşimli olarak ortaya çıkan bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte Gonçalves vd. [315]'ne göre ağaç yaşının da dalga yayılım hızına etkisi vardır. Bu etki 15 yaş altı ve üstü olarak sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kızılçam, karaçam ve sarıçam tomruklar, sırası ile yaklaşık 95, 125 ve 115 yaşlarındadır. Dolayısıyla yaşın dalga yayılım hızına etkisiyle ilgili bir ilişkilendirme yapılamamıştır.

Hasegawa ve Sasaki [479]'ye göre odundaki basma gerilmesinin artması kesme dalga hızının azalmasına neden olurken çekme gerilmesi altındaki odunun kesme dalga hızı, gerilmenin artması ile artmıştır. Akustik anizotropi denilen kesme dalgasındaki görece farklılık uygulanan gerilmenin bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Odunun anizotropik yapısından dolayı yayılım yapan dalganın hızı, L, R ve T yönlerinde farklılaşır ve bu durum akustik anizotropi olarak adlandırılır [479].

3.4.2. Efektif Frekans

Bir cisim içerisinde yayılım yapan sinyal, malzeme özellikleri, sinyal frekansı, çevre koşulları vb. nedenler ile zayıflar. Bu zayıflama, yayılım yapan sinyalin frekansında değişime neden olur. Bu değişim sonucu ölçülen frekansa, efektif frekans denir. Kızılçam, karaçam ve sarıçam odununun LR, LT ve RT düzlemlerinde yayılım yapan 1MHz frekanslı kesme dalgasının nominal 64mm yayılım mesafesinde rutubete bağlı olarak uğradığı sinyal zayıflaması sonucu ölçülen efektif frekanslar, sırası ile Çizelge 3.86, Çizelge 3.87 ve Çizelge 3.88'de gösterilmiştir.

Kızılçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının sinyali, Çizelge 3.86'da görüldüğü üzere tüm yönlerde rutubete bağlı olarak zayıflamıştır. %45 bağıl nemdeki LR, LT ve RT düzlemlerinde efektif frekans değerleri, Bağıl nemin %65, 75 ve 85'e çıkması ile sırası ile %4,2, 6,3 ve 7,3, %5,3, 7,4 ve 7,9 ve %7,5, 13,5 ve 17,2 oranında zayıflamamıştır.

Çizelge 3.86. Kızılcım odununda hesaplanan efektif frekanslar.

Efektif Frekans - Yayılım Yönü (kHz)	Bağıl Nem (%)			
	45	65	75	85
EF _{RT}	143	133	126	122
EF _{LT}	219	208	204	203
EF _{LR}	221	212	208	206

Karaçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının sinyali, Çizelge 3.87’de görüldüğü üzere tüm yönlerde rutubete bağlı olarak zayıflamıştır. %45 bağıl nemdeki LR, LT ve RT düzlemlerinde efektif frekans değerleri, bağıl nemin %65, 75 ve 85’e çıkması ile sırası ile %7,9, 9,1 ve 9,7, %7,7, 8,3 ve 8,9 ve %9,1, 10,1 ve 11,1 oranında zayıflamamıştır.

Çizelge 3.87. Karaçam odununda hesaplanan efektif frekanslar.

Efektif Frekans - Yayılım Yönü (kHz)	Bağıl Nem (%)			
	45	65	75	85
EF _{RT}	120	110	109	108
EF _{LT}	196	182	181	180
EF _{LR}	204	189	187	186

Sarıçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının sinyali, Çizelge 3.88’de görüldüğü üzere tüm yönlerde rutubete bağlı olarak zayıflamıştır. %45 bağıl nemdeki LR, LT ve RT düzlemlerinde efektif frekans değerleri, bağıl nemin %65, 75 ve 85’e çıkması ile sırası ile %7,9, 9,8 ve 13,4, %8,7, 12,3 ve 15,5 ve %10,3, 13,5 ve 16,8 oranında zayıflamamıştır.

Çizelge 3.88. Sarıçam odununda hesaplanan efektif frekanslar.

Efektif Frekans - Yayılım Yönü (kHz)	Bağıl Nem (%)			
	45	65	75	85
EF _{RT}	118	107	104	101
EF _{LT}	238	219	212	206
EF _{LR}	246	228	224	217

Odunun rutubet içeriğinin artması, sinyal zayıflamasına neden olurken en yüksek zayıflama oranı kızılçam odunu %85 bağıl nemdeki RT düzleminde yayılım yapan kesme dalgasında meydana gelmiştir. Diğer türlerde de en yüksek sinyal zayıflama oranları, RT düzleminde yayılım yapan kesme dalgasında meydana gelmiştir.

Bucur ve Feeney [480] %12 rutubet içeriğine sahip 510kg/m³ yoğunluklu kestane odununda yayılım yapan değişik frekanslara sahip boyuna ve kesme dalgalarının sinyal zayıflamasını incelemiş ve zayıflamanın eksen dışı yayılımlarda genellikle daha fazla olduğunu belirtmiştir. Bu çalışma ile kızılçam, karaçam ve sarıçam odunun LR, LT ve RT düzlemlerinde yayılım yapan 1MHz frekanslı kesme dalgasının nominal 64mm yayılım mesafesinde uğradığı sinyal zayıflaması, rutubet içeriğine bağlı olarak belirlenmiştir. Cochran [481]'a göre ultrasonik sinyal zayıflaması, mesafe ile meydana gelir ve frekans ile doğrusal olarak artar. Bu çalışmada transdüserler arası mesafe hemen hemen sabit olduğu için mesafenin etkisi yerine rutubetin etkisi belirlenmiştir. Buna göre rutubet içeriği artışı ile bütün örneklerin tüm yönlerinde sinyal zayıflaması artmıştır. Schmerr ve Song [416]'a göre ultrasonik sinyalde meydana gelen zayıflamanın nedeni çok karmaşıktır ve sinyalin genliği, yayın yaptığı yol boyunca azalır. Krautkraemer ve Krautkraemer [118]'e göre sinyal azalım katsayısı (α) odunda genellikle absorpsiyon nedeni ile meydana gelmektedir.

Ayan [107]'a göre odunda ses yutumu, ışığa ve moleküler sürtünme sonucu meydana gelmektedir ve odunun rutubet içeriği, ışığa yoluyla gerçekleşen ses yutumu üzerinde etkili olduğundan odunun rutubet içeriğinin %5-7 seviyelerinde olması gereklidir.

“Ağaç malzemenin sesi yutması yapısına, yoğunluğuna, yüzey özelliklerine, rutubetine, kalınlığına, sıcaklığına ve ses frekansına göre değişmektedir. Ağaç malzemenin yapısı düzensizleştikçe, yoğunluğu, yüzey pürüzlülüğü, rutubeti ve sıcaklığı arttıkça yutma miktarı da artmaktadır” [107].

3.4.3. Dalga Boyu

Kızılçam, karaçam ve sarıçam odunlarında yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının dalga boyu (λ) ve bunun rutubet içeriği artışı ile etkileşimi, sırası ile Çizelge 3.89, Çizelge 3.90 ve Çizelge 3.91'de gösterilmiştir.

Kızılçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalga sinyalinin %45 bağıl nemdeki dalga boyu (λ), Çizelge 3.89'da görüldüğü üzere rutubet içeriği artışına bağlı olarak tüm yönlerde değişmiştir. %45 bağıl neme göre en yüksek artış, RT

(%85 bağıl nemde %9,1) düzleminde görülmüştür. Fakat tüm yöndeki değişimler, bağıl nem artışı ile doğrusal olarak meydana gelmemiştir. LR düzleminin %65, 75 ve 85 bağıl nemdeki değerleri %45 bağıl neme göre düşmüş ve sabit kalmışken LT düzleminin %65 bağıl nemdeki değeri biraz yükselmiş ve sonrasında düşüş eğilimi göstermiştir.

Çizelge 3.89. Kızılcım odunu yönlere ve bağıl neme bağlı dalga boyları.

Dalga Boyu λ (mm)	Bağıl Nem (%)			
	45	65	75	85
λ_{RT}	4,78	5,01	5,17	5,26
λ_{LT}	6,13	6,27	6,25	6,22
λ_{LR}	6,55	6,64	6,64	6,64

Karaçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalga sinyalinin %45 bağıl nemdeki dalga boyu (λ), Çizelge 3.90'da görüldüğü üzere rutubet içeriği artışına bağlı olarak %85 bağıl nemdeki LT düzlemi hariç tüm yönlerde farklı oranlarda artmıştır. %45 bağıl neme göre en yüksek artış, RT (%65 bağıl nemde %4,2) düzleminde görülmüştür.

Çizelge 3.90. Karaçam odunu yönlere ve bağıl neme bağlı dalga boyları.

Dalga Boyu λ (mm)	Bağıl Nem [%]			
	45	65	75	85
λ_{RT}	4,83	5,04	4,94	4,87
λ_{LT}	6,36	6,50	6,43	6,34
λ_{LR}	7,06	7,28	7,27	7,16

Sarıçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalga sinyalinin %45 bağıl nemdeki dalga boyu (λ), Çizelge 3.91'de görüldüğü üzere rutubet içeriği artışına bağlı olarak tüm yönlerde artmıştır. %45 bağıl neme göre en yüksek artış, RT (%85 bağıl nemde %9,9) düzleminde görülmüştür.

Çizelge 3.91. Sarıçam odunu yönlere ve bağıl neme bağlı dalga boyları.

Dalga Boyu λ (mm)	Bağıl Nem (%)			
	45	65	75	85
λ_{RT}	5,01	5,41	5,45	5,56
λ_{LT}	5,57	5,91	6,05	6,15
λ_{LR}	5,47	5,76	5,79	5,93

3.4.4. Yayılım Uzunluğu İle Dalga Boyu Arasındaki İlişki

Kızılçam, karaçam ve sarıçam odunlarında yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının yayılım uzunluğu ile dalga boyu (λ) arasındaki rutubete bağlı ilişki sırası ile Çizelge 3.92, Çizelge 3.93 ve Çizelge 3.94’de gösterilmiştir.

Kızılçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının yayılım uzunluğu ile dalga boyu (λ) arasındaki oran, Çizelge 3.92’de görüldüğü üzere rutubet artışı ile RT düzleminde azalmışken LT ve LR düzleminde %65 bağıl nemde sırası ile %2,3 ve %1,5 azalmış sonrasında bir miktar artmış fakat %45 bağıl nem seviyesine ulaşmamıştır.

Çizelge 3.92. Kızılçam odununda yayılım uzunluğu ile dalga boyu ilişkisi.

Yayılım Uzunluğu / λ ilişkisi (Düzlem)	Bağıl Nem (%)			
	45	65	75	85
L^*/λ (RT)	13,38	12,78	12,39	12,16
L/λ (LT)	10,44	10,21	10,23	10,29
L/λ (LR)	9,77	9,63	9,64	9,65

*Nominal yayılım uzunluğu: tahribatsız test örneğinin tim doğrultuları için bu değer 64mm’dir.

Karaçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının yayılım uzunluğu ile dalga boyu (λ) arasındaki oranlar, Çizelge 3.93’de görüldüğü üzere %65 bağıl nemdeki RT, LT ve LR düzlemlerinde sırası ile %4,5, %2,1 ve %3,2 düştükten sonra rutubet içeriğinin artması ile %45 bağıl nem değerine yakın bir değere yükselmiştir.

Çizelge 3.93. Karaçam odununda yayılım uzunluğu ile dalga boyu ilişkisi.

Yayılım Uzunluğu / λ ilişkisi (Düzlem)	Bağıl Nem (%)			
	45	65	75	85
L/λ (RT)	13,26	12,69	12,95	13,15
L/λ (LT)	10,06	9,85	9,96	10,09
L/λ (LR)	9,07	8,79	8,81	8,94

Sarıçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının yayılım uzunluğu ile dalga boyu arasındaki oranlar, Çizelge 3.94’de görüldüğü üzere rutubet içeriğinin artması ile tüm düzlemlerde düşmüştür. En yüksek düşüş, %11 ile %85 bağıl nemdeki RT düzlemi değerinde görülmüştür.

Çizelge 3.94. Sarıçam odununda yayılım uzunluğu ile dalga boyu ilişkisi.

Yayılım Uzunluğu / λ ilişkisi (Düzlem)	Bağıl Nem (%)			
	45	65	75	85
L/λ (RT)	12,77	11,82	11,75	11,50
L/λ (LT)	11,49	10,84	10,58	10,40
L/λ (LR)	11,70	11,11	11,05	10,79

Wang [438]’a göre farklı ölçülere sahip kerestelerin dinamik MOE değerleri, boyut (örnek ölçüsü) etkisi nedeni ile uygun düzenlemeler yapılmadan bir arada sınıflandırılıp değerlendirilmemeliyken Trinca ve Gonçalves [418] 500kHz üzeri frekansta gerçekleştirilen ölçümlerde farklı örnek boyutlarının ciddi farklılığa neden olmadığını belirtmiştir.

Oliveira vd. [419] dört farklı yapısal kereste üzerinde gerçekleştirdiği ultrasonik ölçümlerde, örnek boyu ile dalga boyu (L/λ) arasında 3’ten düşük bir oran olması durumunda belirgin bir etkinin olduğunu belirtmiştir. Bu oranın 3’ten büyük olması durumunda ise görece olarak dalga hızının hemen hemen değişmediğini belirtmiştir. Bartholomeu vd. [482] ise enine kesit ölçüsü ile ultrasonik dalga ölçüm boyunun $L/\lambda > 5$ olması durumunda ultrasonik ölçümün gerçekleştirilebileceğini belirtmiştir.

Bu çalışmada en düşük ve en yüksek L/λ değerleri, 8,79 (karaçam, %65 bağıl nem, LR düzlemi) ve 13,38 (kızılcıam, %45 bağıl nem, RT düzlemi) olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

3.4.5. Yakın Alan

Kızılçam, karaçam ve sarıçam odunlarında yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının yakın alan değerlerinin rutubete bağlı değişimi, sırası ile Çizelge 3.95, Çizelge 3.96 ve Çizelge 3.97’de gösterilmiştir.

Kızılçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının yakın alan değerleri, Çizelge 3.95’de görüldüğü üzere rutubet artışı ile RT düzleminde azalmışken LT ve LR düzleminde %65 bağıl nemde sırası ile %2,2 ve %1,4 düştükten sonra rutubet içeriğinin artması ile %45 bağıl nem değerine yakın bir değere yükselmiştir.

Çizelge 3.95. Kızılçam odunu yakın alan değerleri.

Yakın Alan (Near Field-NF*) (mm)	Bağıl Nem (%)			
	45	65	75	85
NF _{RT}	8,83	8,44	8,18	8,03
NF _{LT}	6,89	6,74	6,76	6,80
NF _{LR}	6,45	6,36	6,37	6,37

* Ölçümlerde kullanılan Panametrics-NDT V153 transdüserinin çapı 13mm’dir.

Karaçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının yakın alan değerleri, Çizelge 3.96’da görüldüğü üzere %65 bağıl nemdeki RT, LT ve LR düzlemlerinde sırası ile %4,5, %2,2 ve %3,3 düştükten sonra rutubet içeriğinin artması ile %45 bağıl nem değerine yakın bir değere yükselmiştir.

Çizelge 3.96. Karaçam odununun yakın alan değerleri.

Yakın Alan (Near Field-NF) (mm)	Bağıl Nem (%)			
	45	65	75	85
NF _{RT}	8,76	8,38	8,55	8,68
NF _{LT}	6,64	6,50	6,58	6,66
NF _{LR}	5,99	5,80	5,82	5,90

Sarıçam odununda yayılım yapan 1MHz frekanslı ultrasonik kesme dalgasının yakın alan değerleri, Çizelge 3.97’de görüldüğü üzere rutubet içeriğinin artması ile tüm düzlemlerde düşmüştür. En yüksek düşüş, %11,1 ile %85 bağıl nemdeki RT düzlemi değerinde görülmüştür.

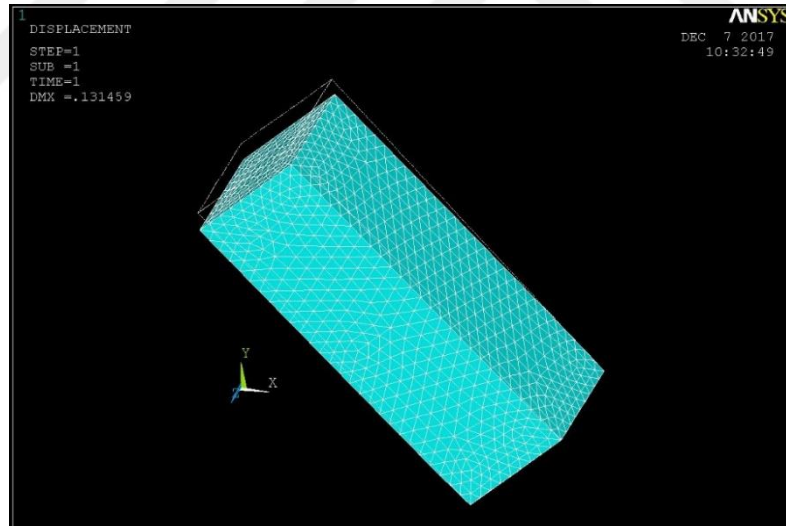
Çizelge 3.97. Sarıçam odununun yakın alan değerleri.

Yakın Alan (Near Field-NF) (mm)	Bağıl Nem (%)			
	45	65	75	85
NF _{RT}	8,43	7,80	7,76	7,59
NF _{LT}	7,59	7,15	6,98	6,87
NF _{LR}	7,73	7,34	7,30	7,12

3.5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ BULGULARI

3.5.1. Karaçamın Linear Ortotropik Davranışı

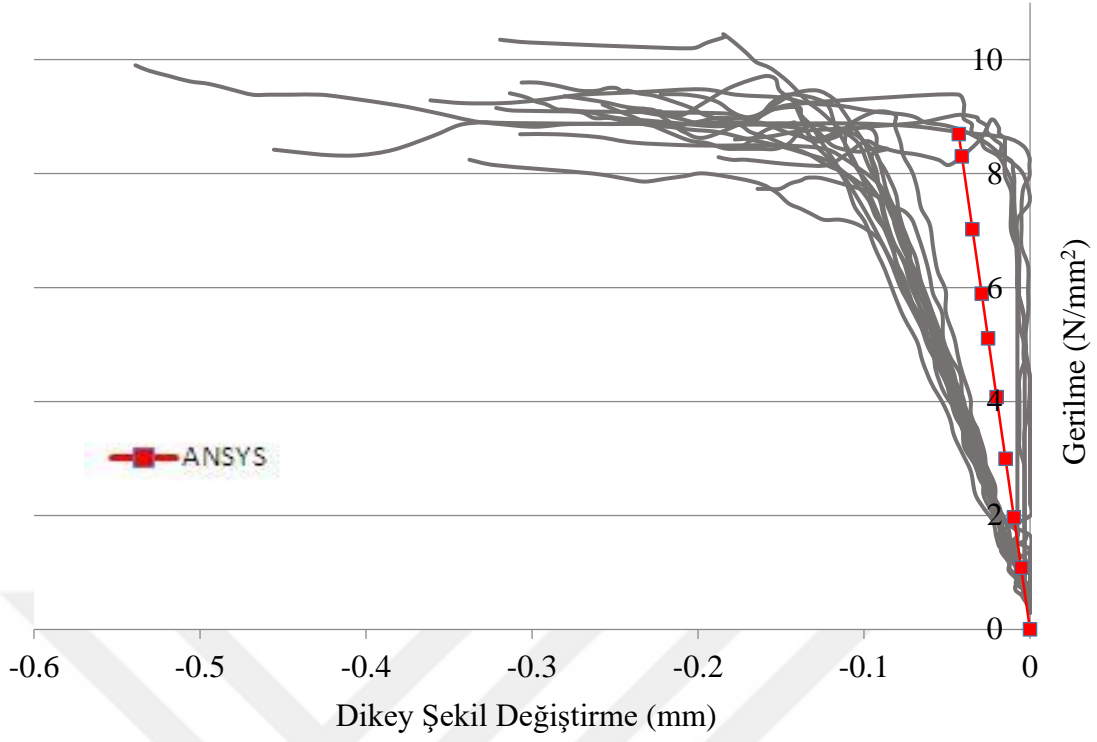
Karaçam LR45 basma SE modellemesinin yapısal şekil değiştirme davranışı ve gerilme-şekil değiştirme sonuçları, sırasıyla Şekil 3.31 ve Çizelge 3.98’de görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen lineer elastik doğru ile statik test sonucu elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



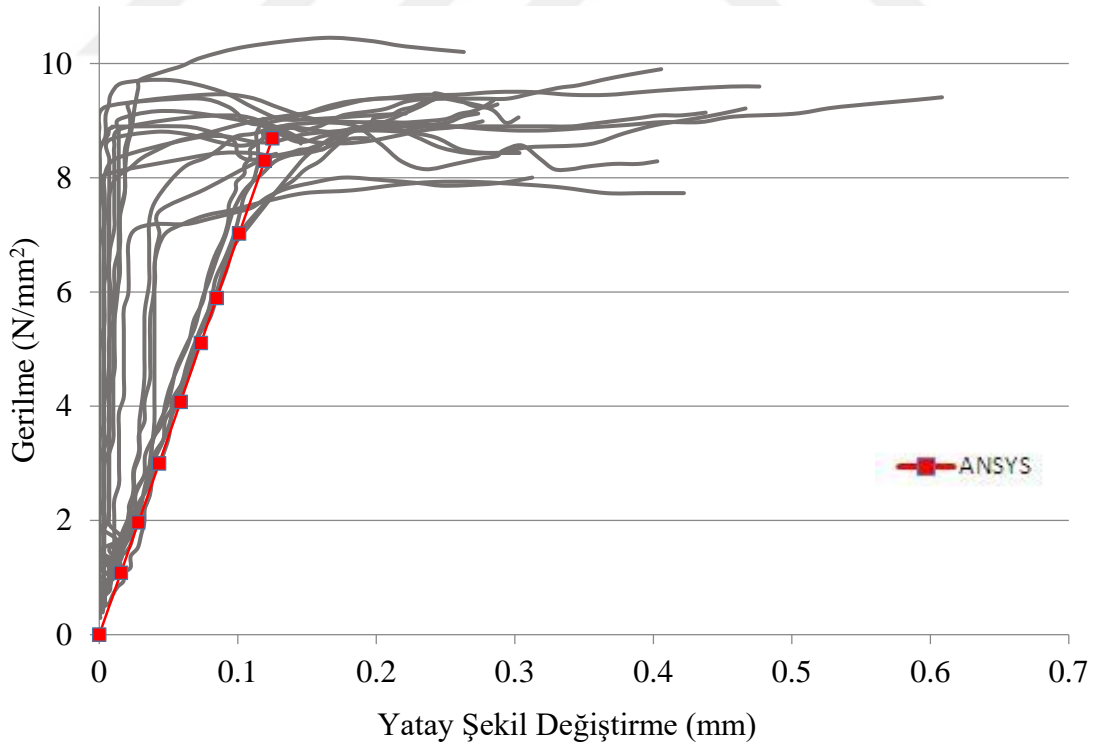
Şekil 3.31. Karaçam LR45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.

Çizelge 3.98. Karaçam LR45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.

Dikey şekil değiştirme (Kısalma) (mm)	-0,0053	-0,0147	-0,0252	-0,0346	-0,0429
Yatay şekil değiştirme (Genişleme) (mm)	0,01552	0,04313	0,0733	0,10093	0,12494
Gerilme (N/mm ²)	1,08	3,00	5,11	7,02	8,69

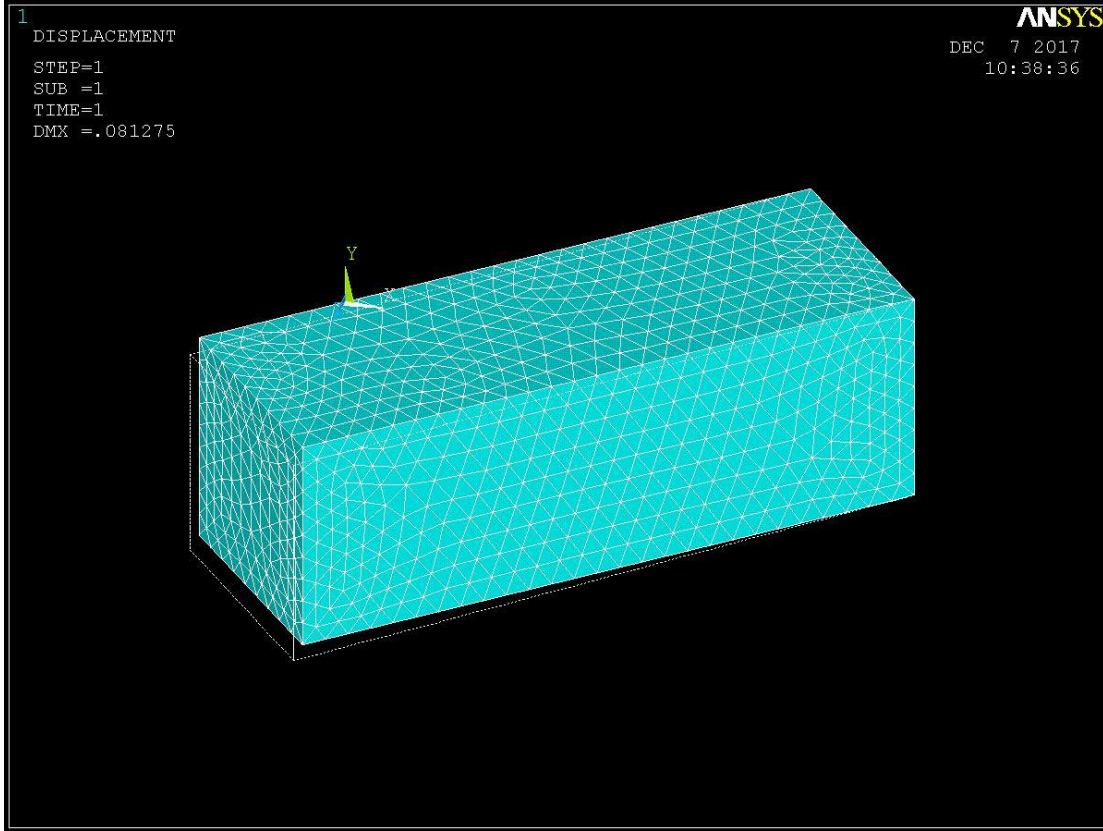


Şekil 3.32. Karaçam eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değişirme (kısılma) verileri.



Şekil 3.33. Karaçam eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değişirme (genişleme) verileri.

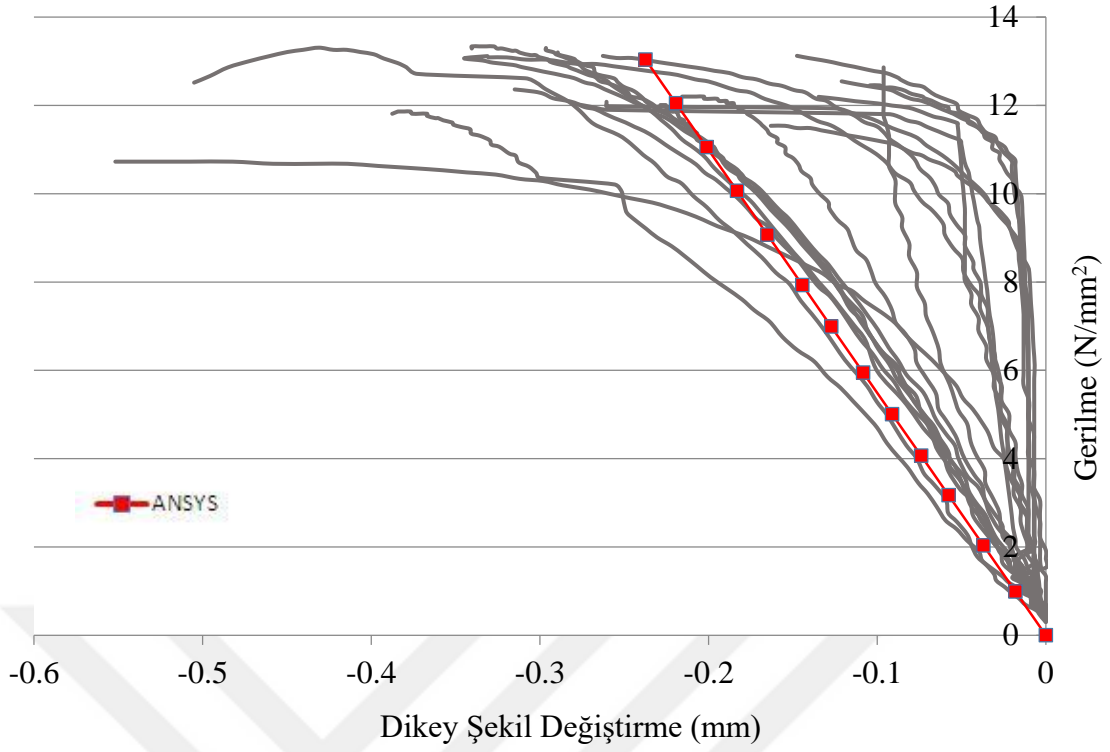
Karaçam LT45 basma SE modellemesinin yapısal şekil değiştirme davranışı ve gerilme-şekil değiştirme sonuçları, sırasıyla Şekil 3.34 ve Çizelge 3.99’da görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen lineer elastik doğru ile statik test sonucu elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.35 ve Şekil 3.36’da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



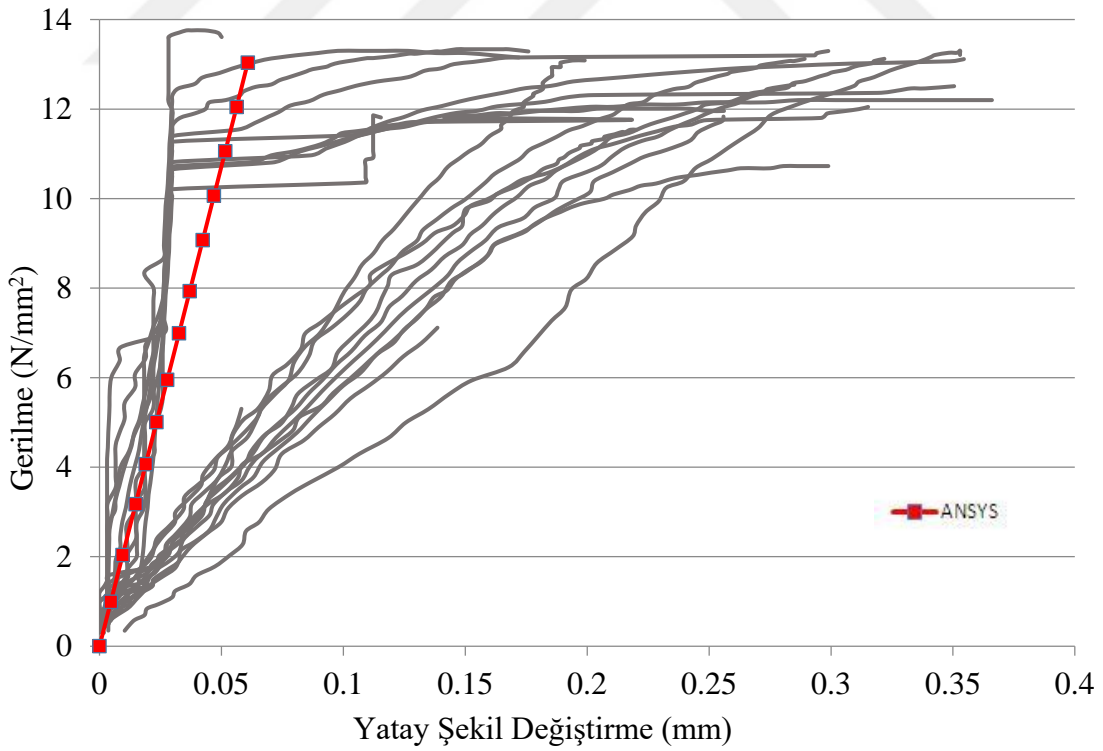
Şekil 3.34. Karaçam LT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.

Çizelge 3.99. Karaçam LT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.

Dikey şekil değiştirme (Kısalma) (mm)	-0,0180	-0,0577	-0,1083	-0,1651	-0,2373
Yatay şekil değiştirme (Genişleme) (mm)	0,00461	0,0147	0,0277	0,04231	0,0608
Gerilme (N/mm ²)	0,99	3,17	5,95	9,07	13,04

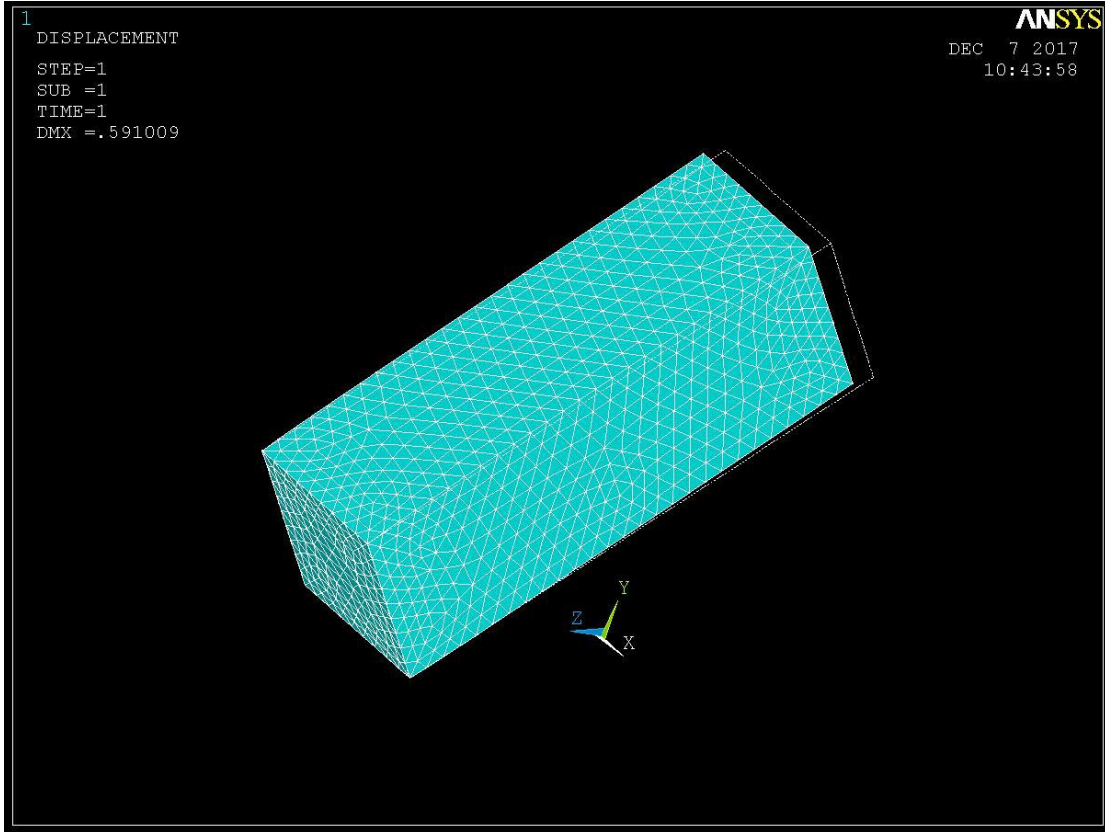


Şekil 3.35. Karaçam eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değişirme (kısılma) verileri.



Şekil 3.36. Karaçam eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değişirme (genişleme) verileri.

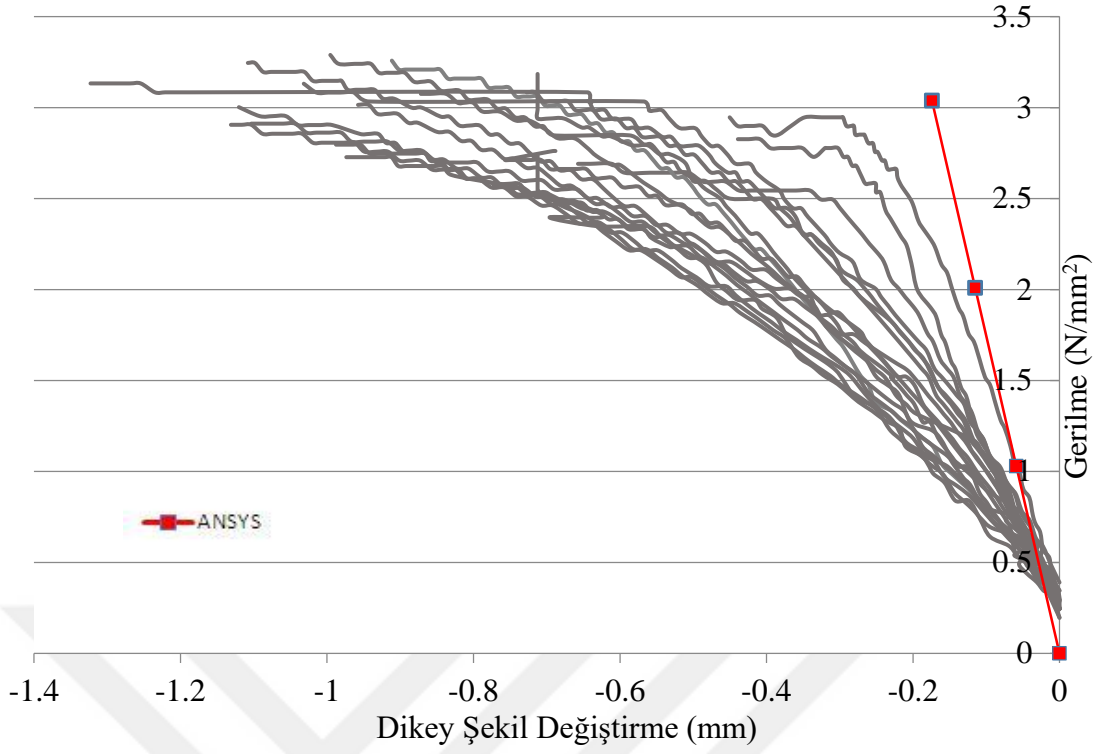
Karaçam RT45 basma SE modellemesinin yapısal şekil değiştirme davranışı ve gerilme-şekil değiştirme sonuçları, sırasıyla Şekil 3.37 ve Çizelge 3.100’de görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile edilen lineer elastik doğru ile statik test sonucu elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, Şekil 3.38 ve Şekil 3.39’da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



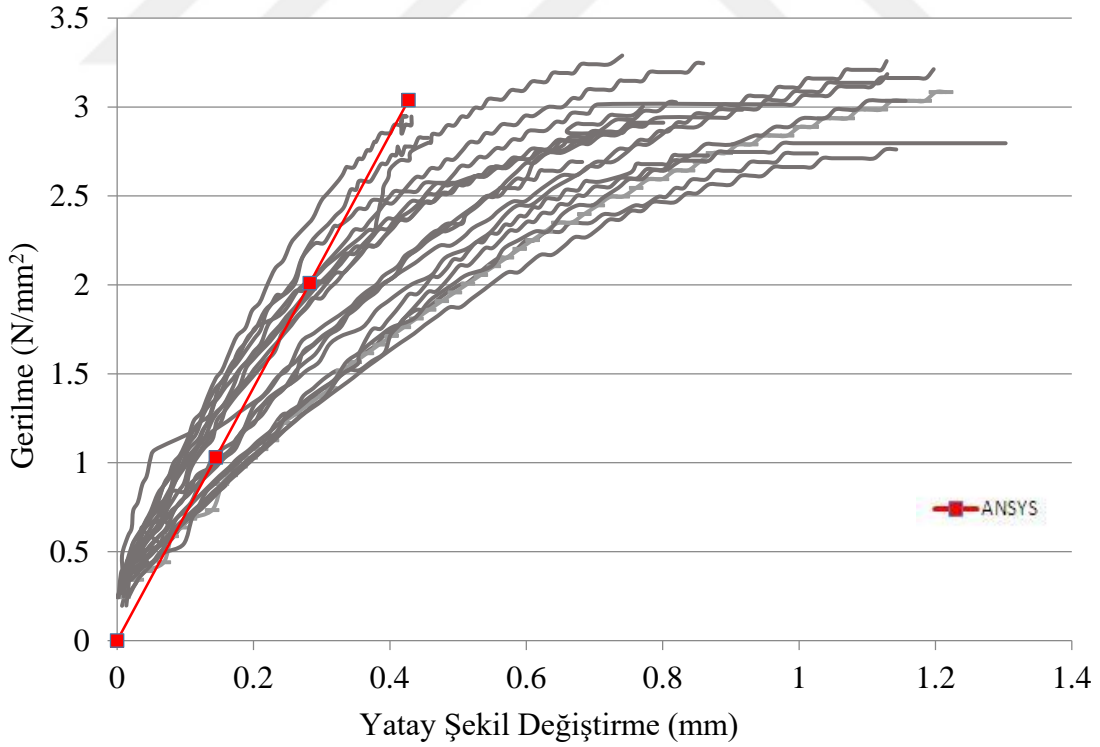
Şekil 3.37. Karaçam RT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.

Çizelge 3.100. Karaçam RT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri

Dikey şekil değiştirme (Kısalma) (mm)	-0,05898	-0,1151	-0,17408
Yatay şekil değiştirme (Genişleme) (mm)	0,144756	0,282484	0,42724
Gerilme (N/mm ²)	1,03	2,01	3,04



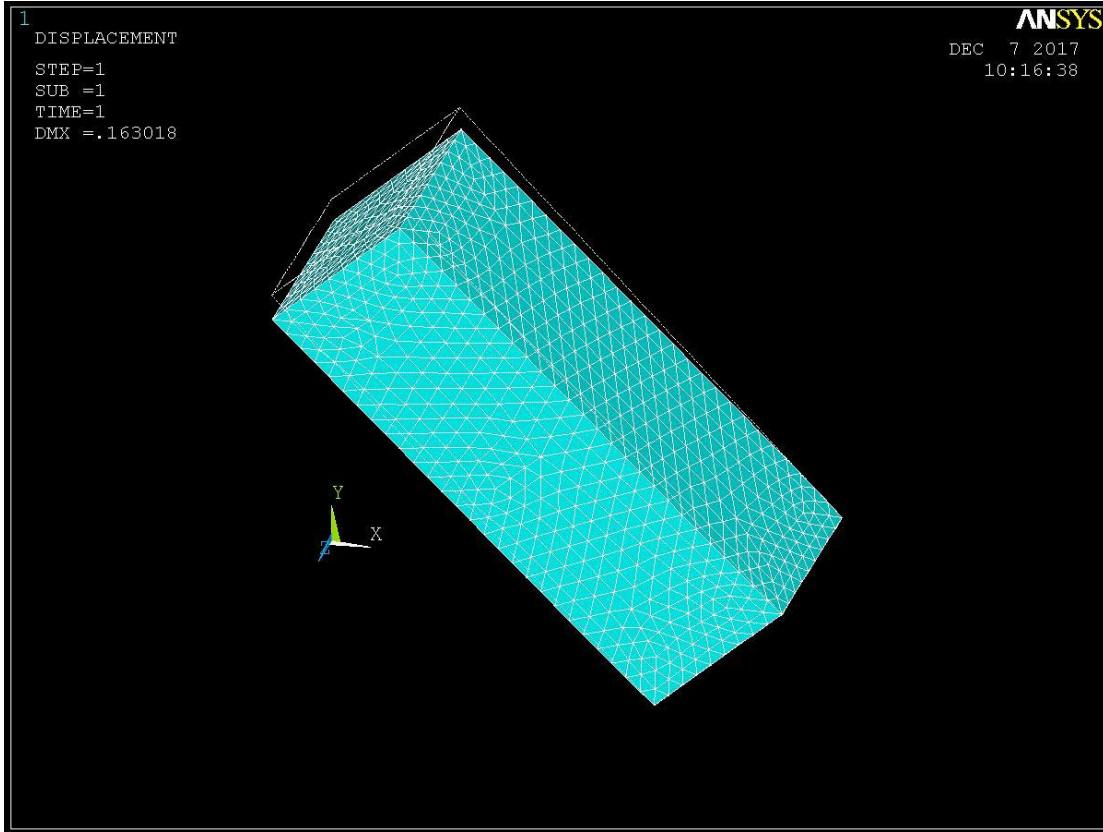
Şekil 3.38. Karaçam eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısılma) verileri.



Şekil 3.39. Karaçam eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.

3.5.2. Kızılçamın Lineer Ortotropik Davranışı

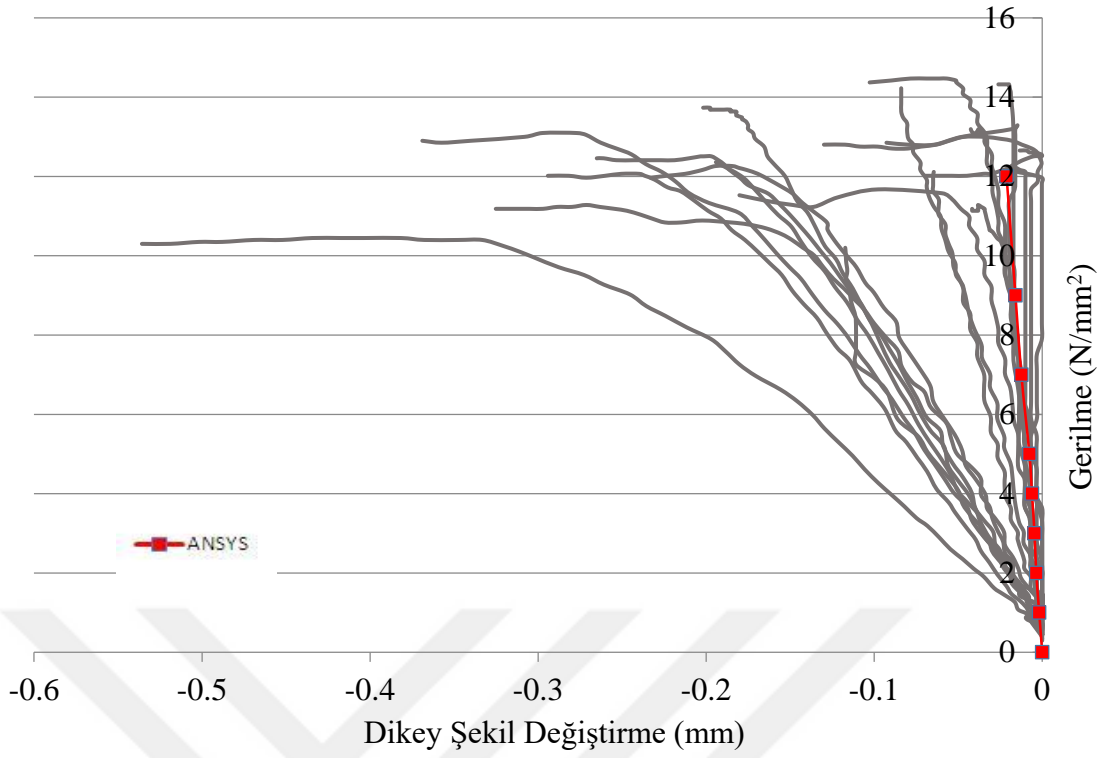
Kızılçam LR45 basma SE modellemesinin yapısal şekil değiştirme davranışı ve gerilme-şekil değiştirme sonuçları, sırasıyla Şekil 3.40 ve Çizelge 3.101’de görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen lineer elastik doğru ile statik test sonucu elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, Şekil 3.41 ve Şekil 3.42’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



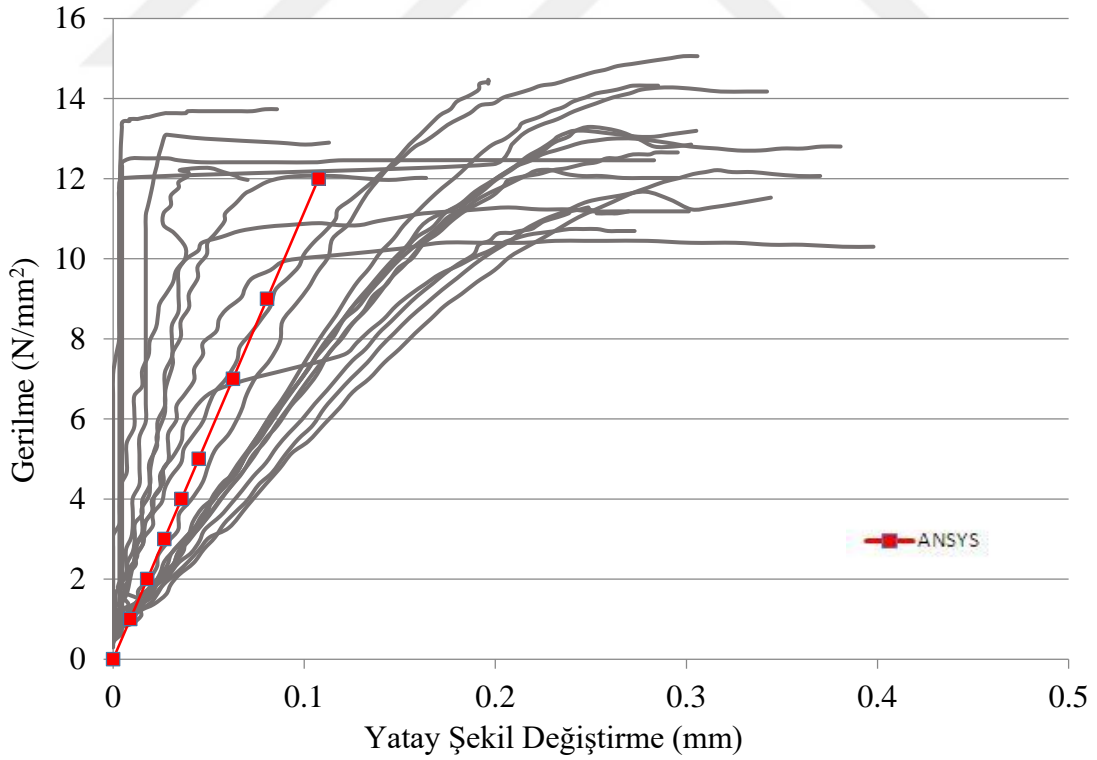
Şekil 3.40. Kızılçam LR45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.

Çizelge 3.101. Kızılçam LR45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.

Dikey şekil değiştirme (Kısalma) (mm)	-0,00177	-0,00456	-0,0076	-0,0124	-0,0212
Yatay şekil değiştirme (Genişleme) (mm)	0,00896	0,0268	0,0448	0,0627	0,1075
Gerilme (N/mm ²)	1	3	5	7	12

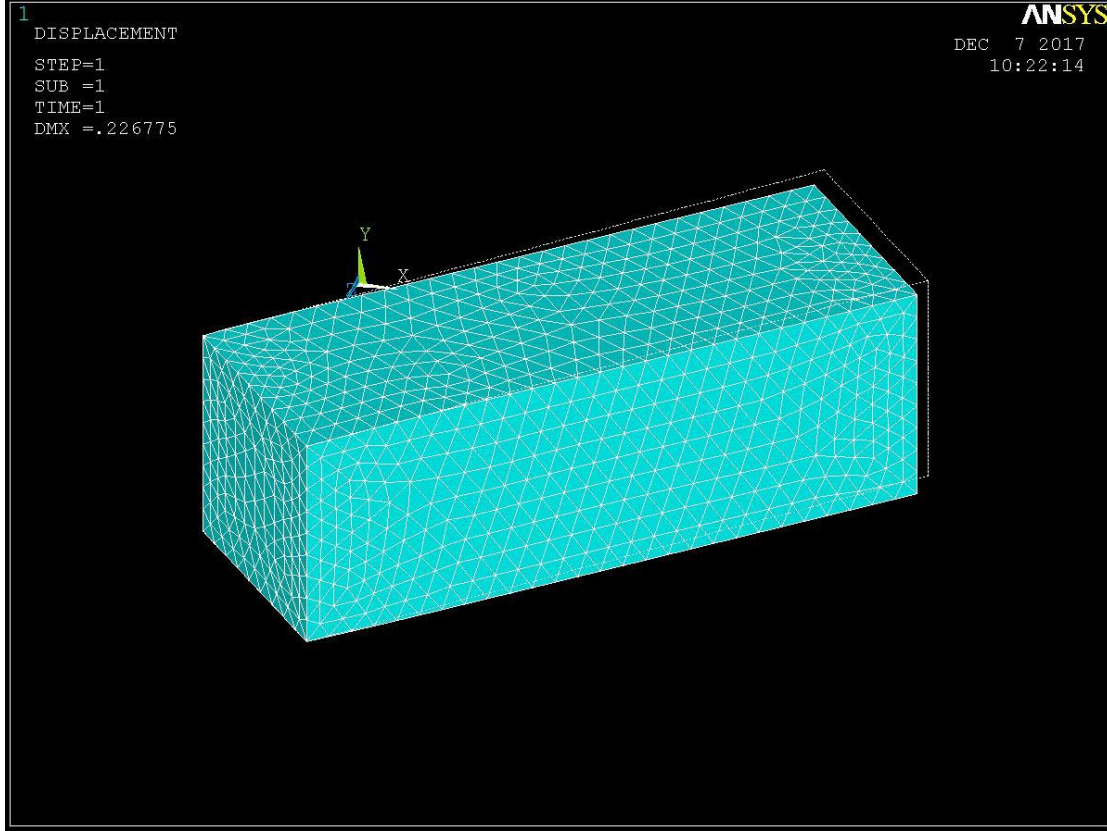


Şekil 3.41. Kızılçamın eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değişirme (kısılma) verileri.



Şekil 3.42. Kızılçamın eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değişirme (genişleme) verileri.

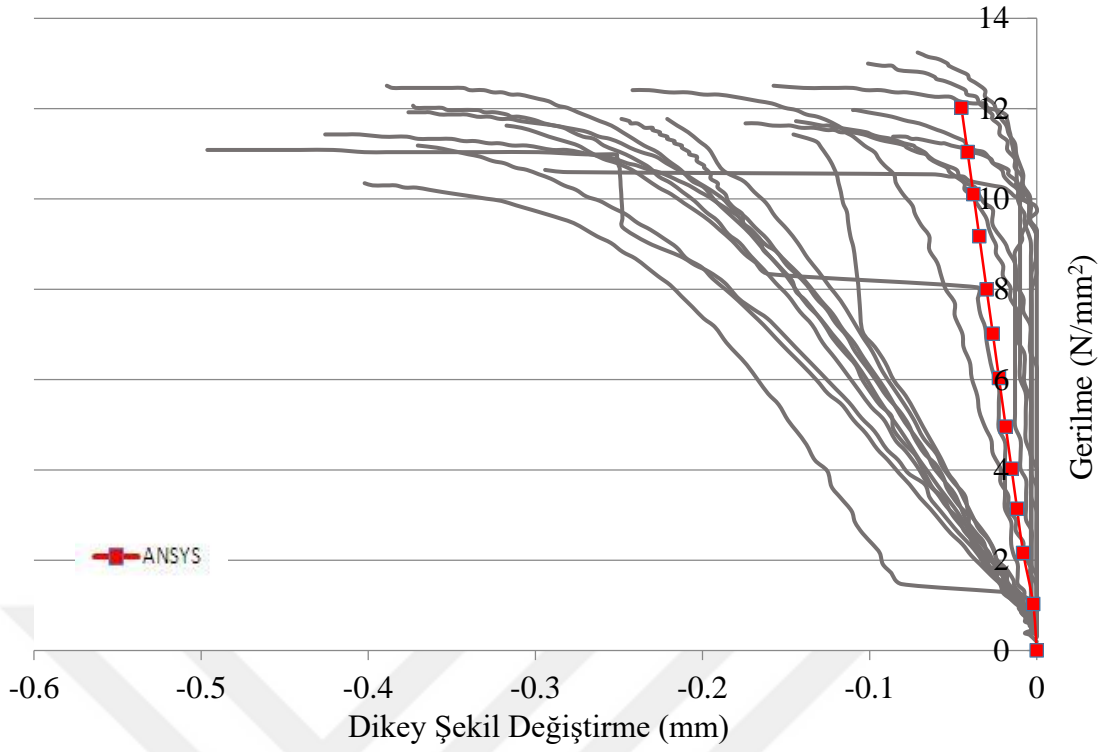
Kızılçam LT45 basma SE modellemesinin yapısal şekil değiştirme davranışı ve gerilme-şekil değiştirme sonuçları, sırasıyla Şekil 3.43 ve Çizelge 3.102’de görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen lineer elastik doğru ile statik test sonucu elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, Şekil 3.44 ve Şekil 3.45’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



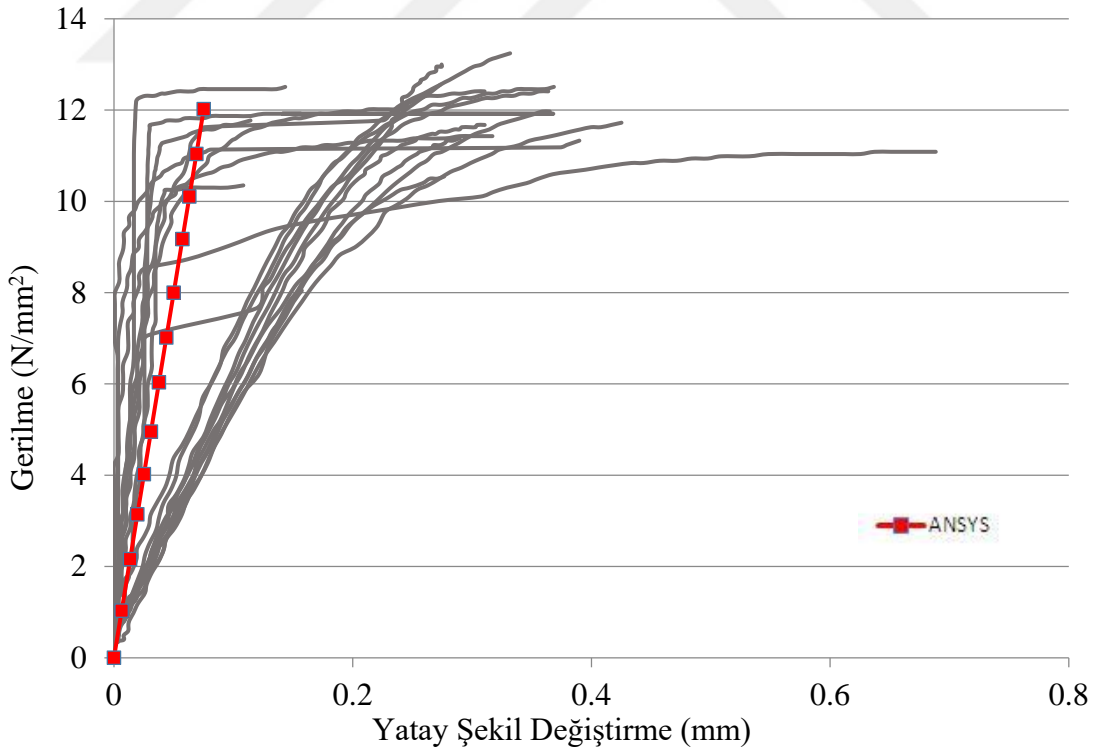
Şekil 3.43. Kızılçam LT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.

Çizelge 3.102. Kızılçam LT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.

Dikey şekil değiştirme (Kısalma) (mm)	-0,00214	-0,01177	-0,01856	-0,03	-0,04507
Yatay şekil değiştirme (Genişleme) (mm)	0,00644	0,01964	0,030961	0,050039	0,075183
Gerilme (N/mm ²)	1,03	3,14	4,95	8,00	12,02

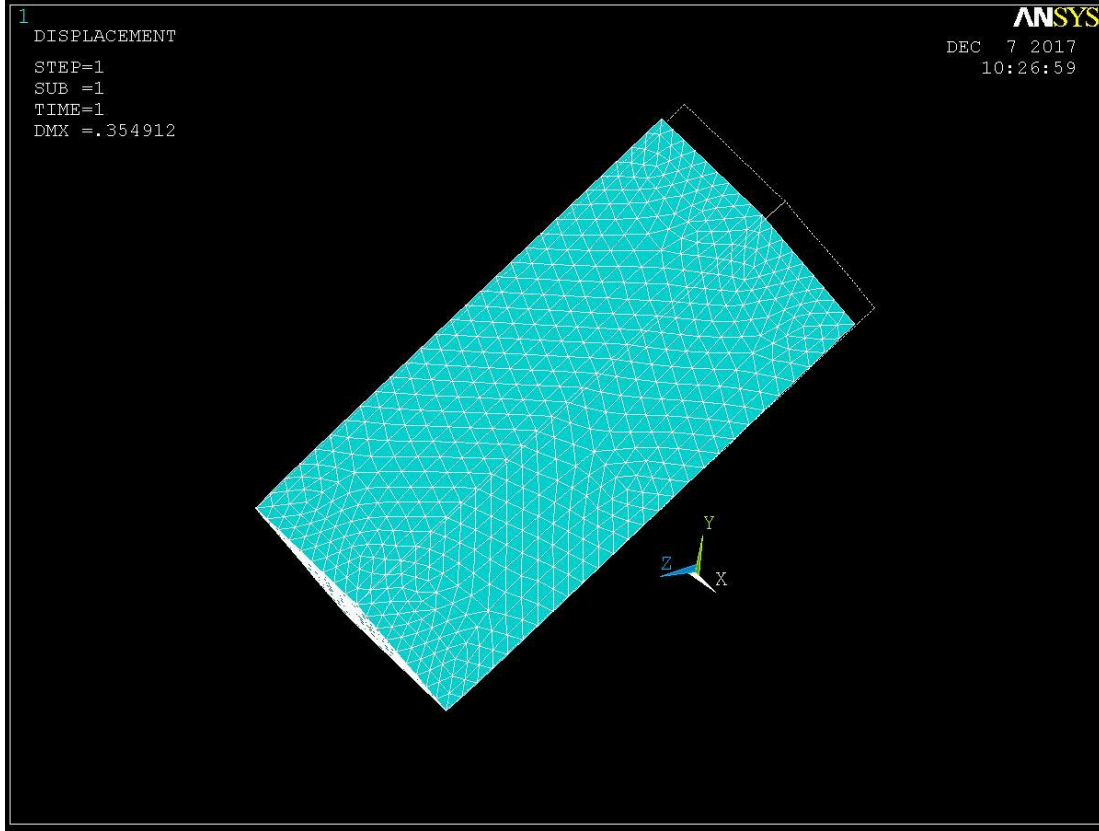


Şekil 3.44. Kızılçamın eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değişirme (kısalma) verileri.



Şekil 3.45. Kızılçamın eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değişirme (genişleme) verileri.

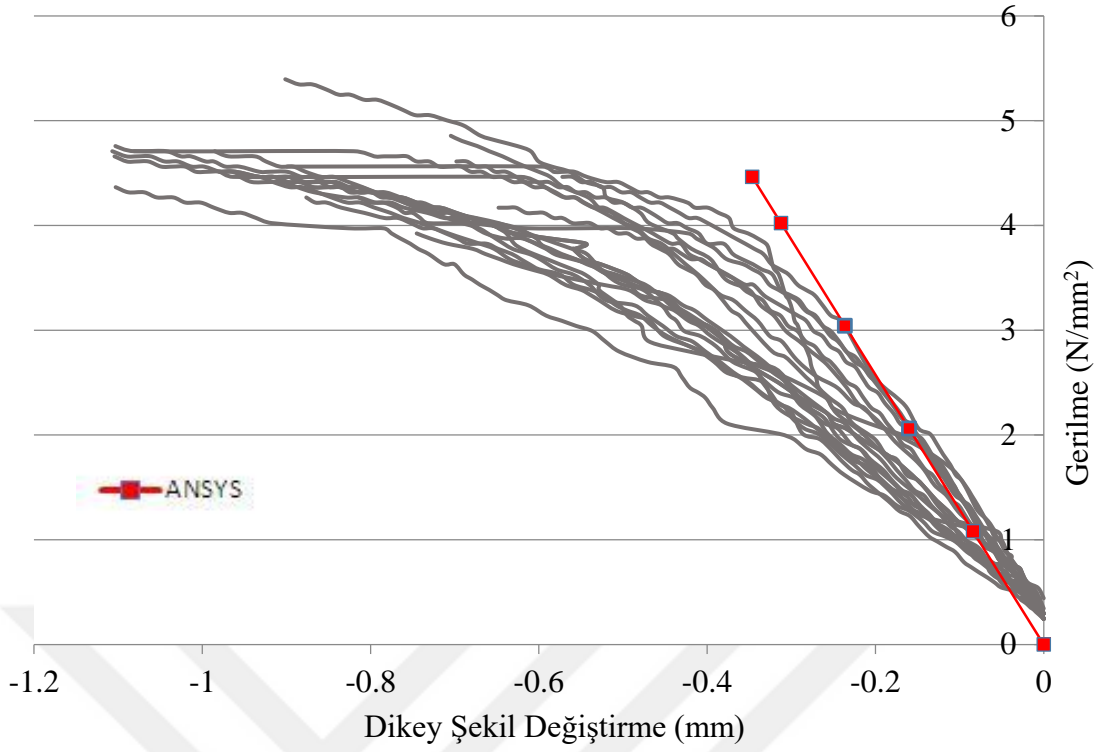
Kızılçam RT45 basma SE modellemesinin yapısal şekil değiştirme davranışı ve gerilme-şekil değiştirme sonuçları, sırasıyla Şekil 3.46 ve Çizelge 3.103’de görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen lineer elastik doğru ile statik test sonucu elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, Şekil 3.47 ve Şekil 3.48’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



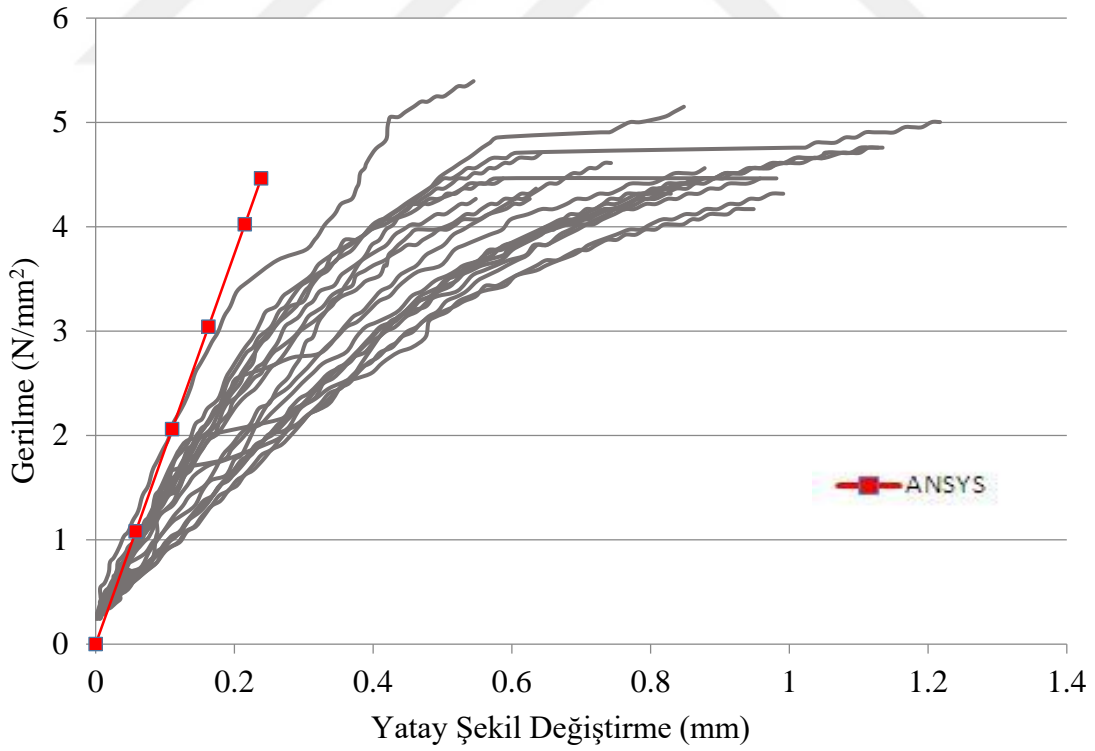
Şekil 3.46. Kızılçam RT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.

Çizelge 3.103. Kızılçam RT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.

Dikey şekil değiştirme (Kısalma) (mm)	-0,08389	-0,16001	-0,23613	-0,31225	-0,34642
Yatay şekil değiştirme (Genişleme) (mm)	0,057785	0,11022	0,162655	0,21509	0,238632
Gerilme (N/mm ²)	1,08	2,06	3,04	4,02	4,46



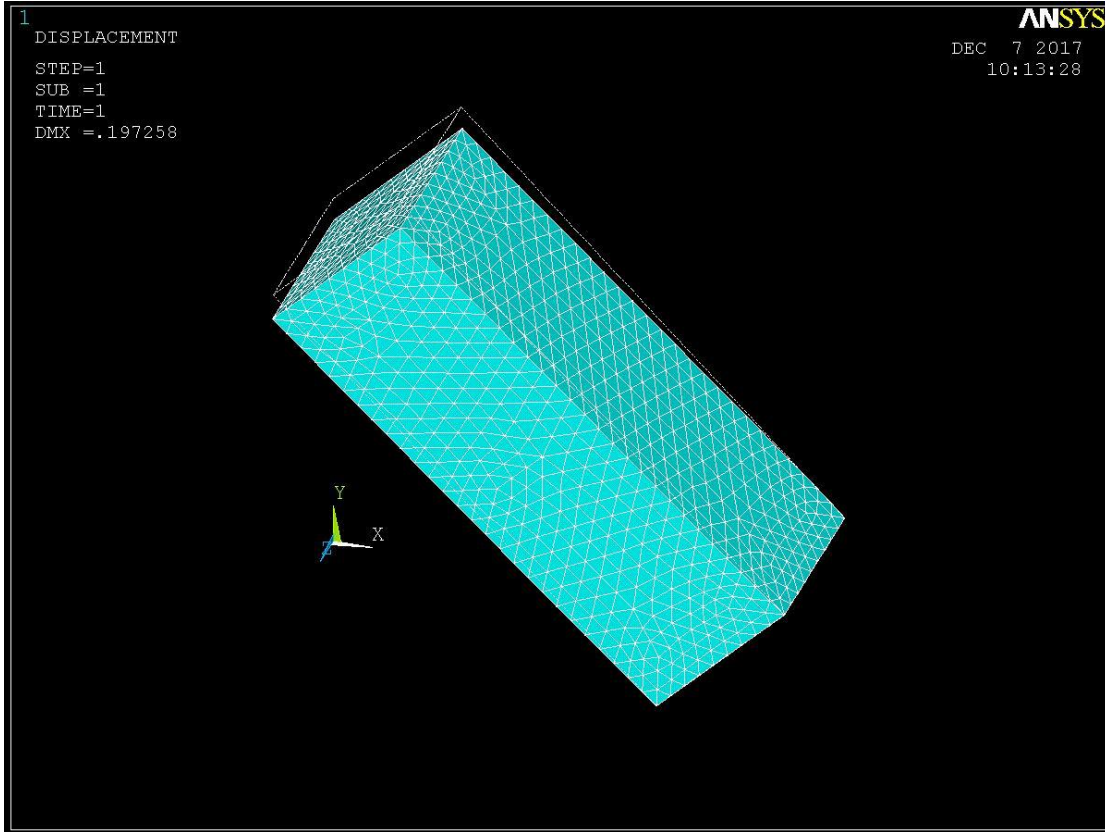
Şekil 3.47. Kızılçamın eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.



Şekil 3.48. Kızılçamın eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.

3.5.3. Sarıçamın Lineer Ortotropik Davranışı

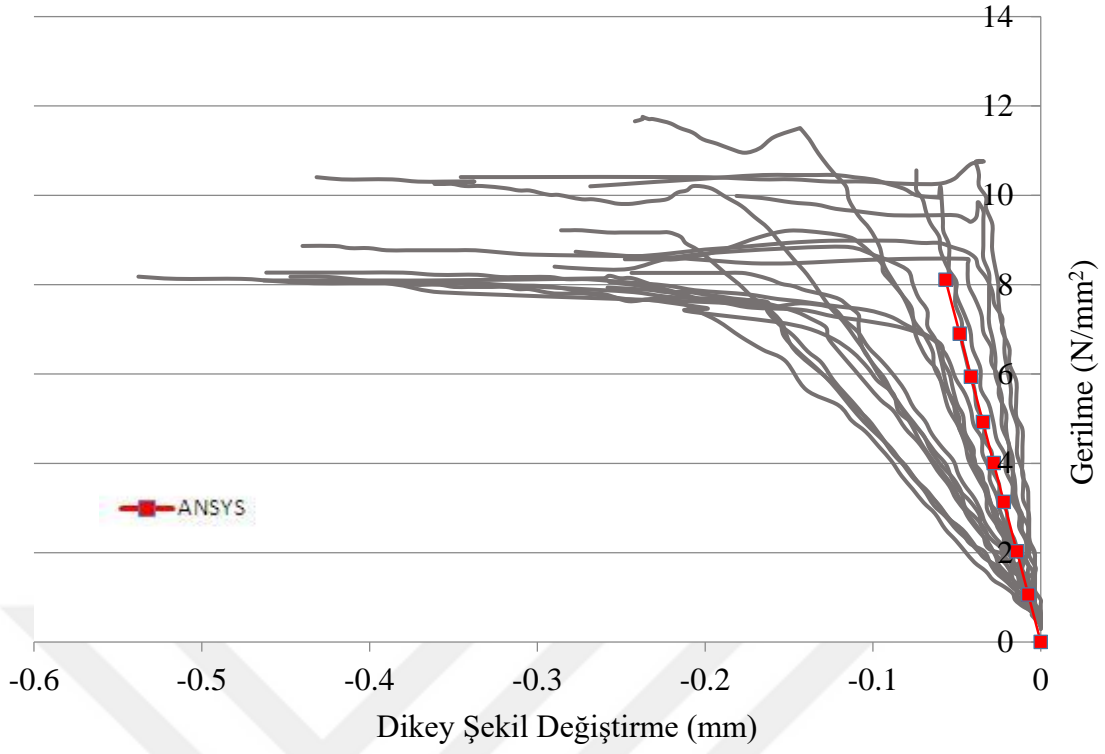
Sarıçam LR45 basma SE modellemesinin yapısal şekil değiştirme davranışı ve gerilme-şekil değiştirme sonuçları, sırasıyla Şekil 3.49 ve Çizelge 3.104’de görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen lineer elastik doğru ile statik test sonucu elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, Şekil 3.50 ve Şekil 3.51’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



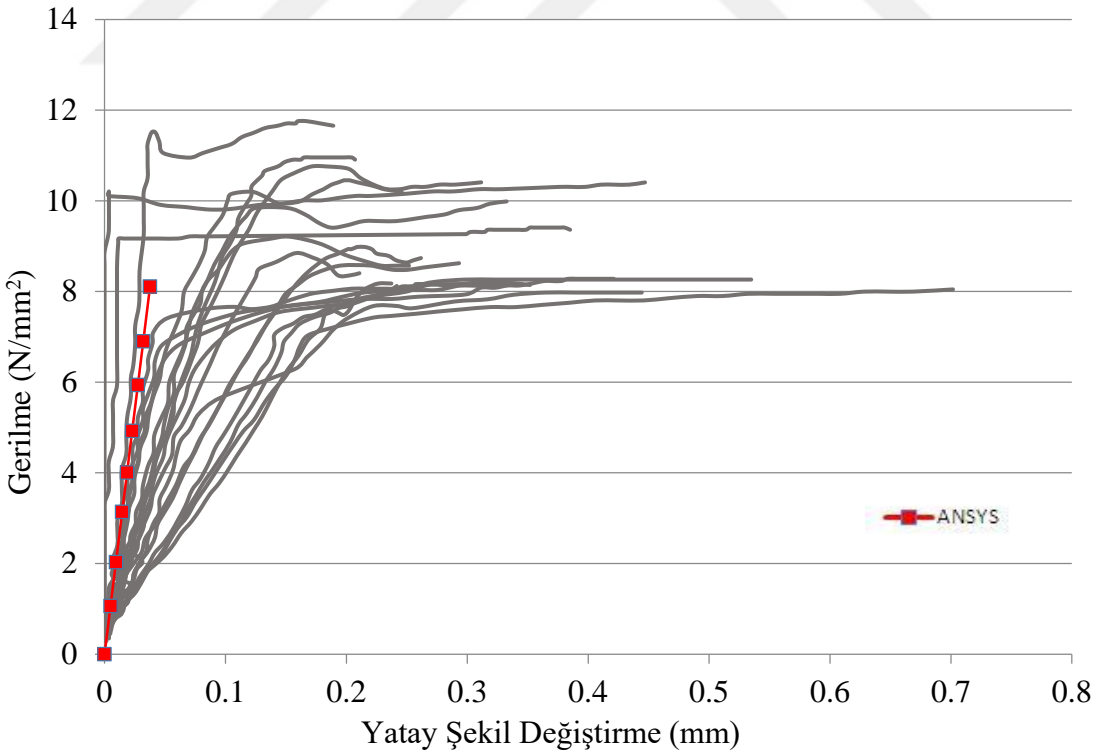
Şekil 3.49. Sarıçam LR45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.

Çizelge 3.104. Sarıçam LR45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.

Dikey şekil değiştirme (Kısalma) (mm)	-0,00742	-0,02197	-0,03443	-0,04828	-0,05675
Yatay şekil değiştirme (Genişleme) (mm)	0,004914	0,014556	0,022807	0,031986	0,037595
Gerilme (N/mm ²)	1,06	3,14	4,92	6,90	8,11

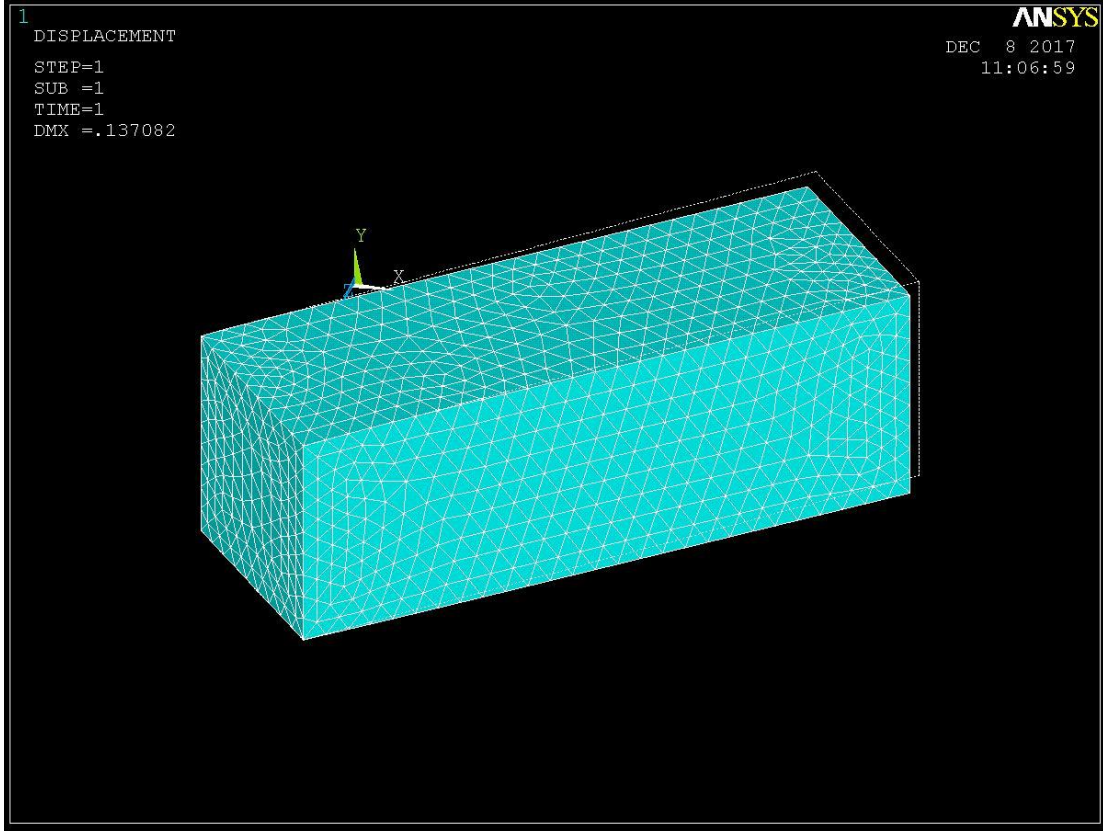


Şekil 3.50. Sarıçam eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.



Şekil 3.51. Sarıçam eksen dışı LR basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.

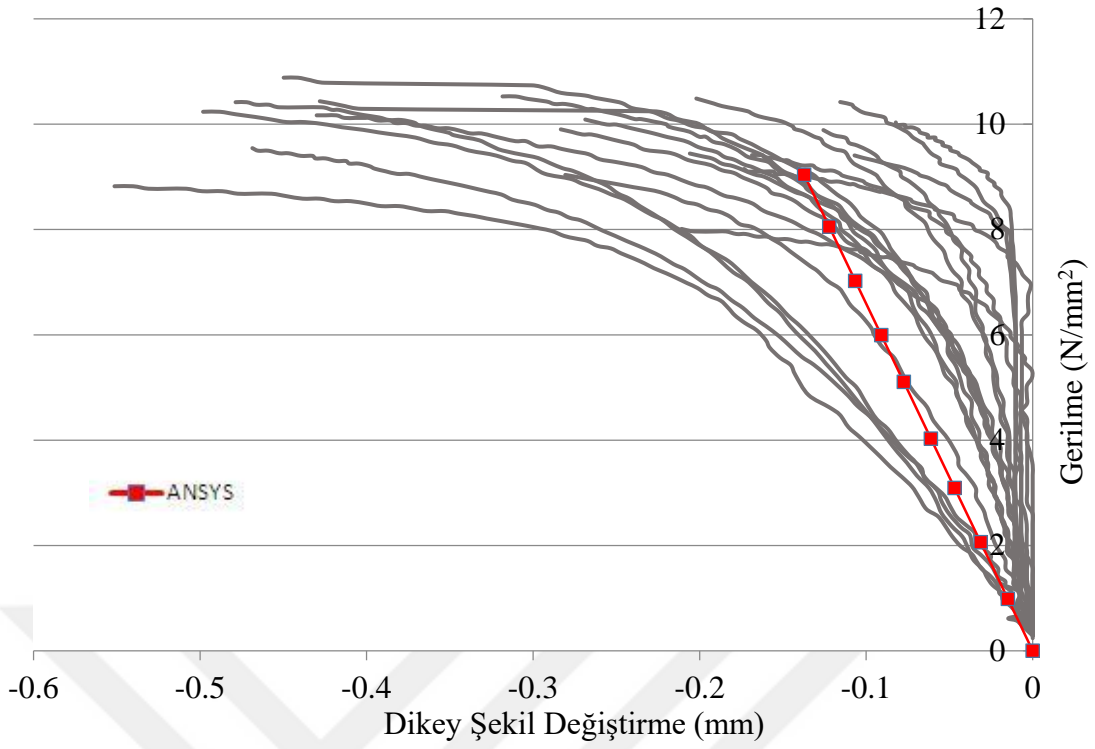
Sarıçam LT45 basma SE modellemesinin yapısal şekil değiştirme davranışı ve gerilme-şekil değiştirme sonuçları, sırasıyla Şekil 3.52 ve Çizelge 3.105’de görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen lineer elastik doğru ile statik test sonucu elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, Şekil 3.53 ve Şekil 3.54’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



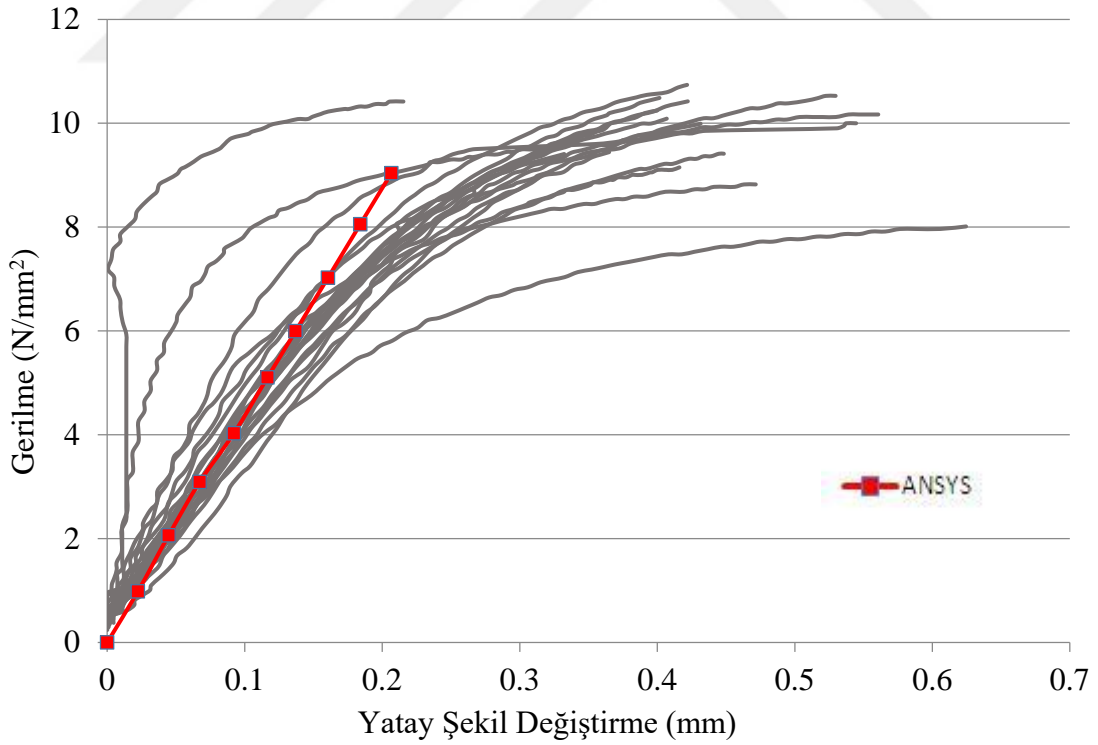
Şekil 3.52. Sarıçam LT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.

Çizelge 3.105. Sarıçam LT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.

Dikey şekil değiştirme (Kısalma) (mm)	-0,01487	-0,0469	-0,07741	-0,10655	-0,13721
Yatay şekil değiştirme (Genişleme) (mm)	0,022311	0,067199	0,116569	0,16054	0,206625
Gerilme (N/mm ²)	0,98	3,09	5,10	7,02	9,04

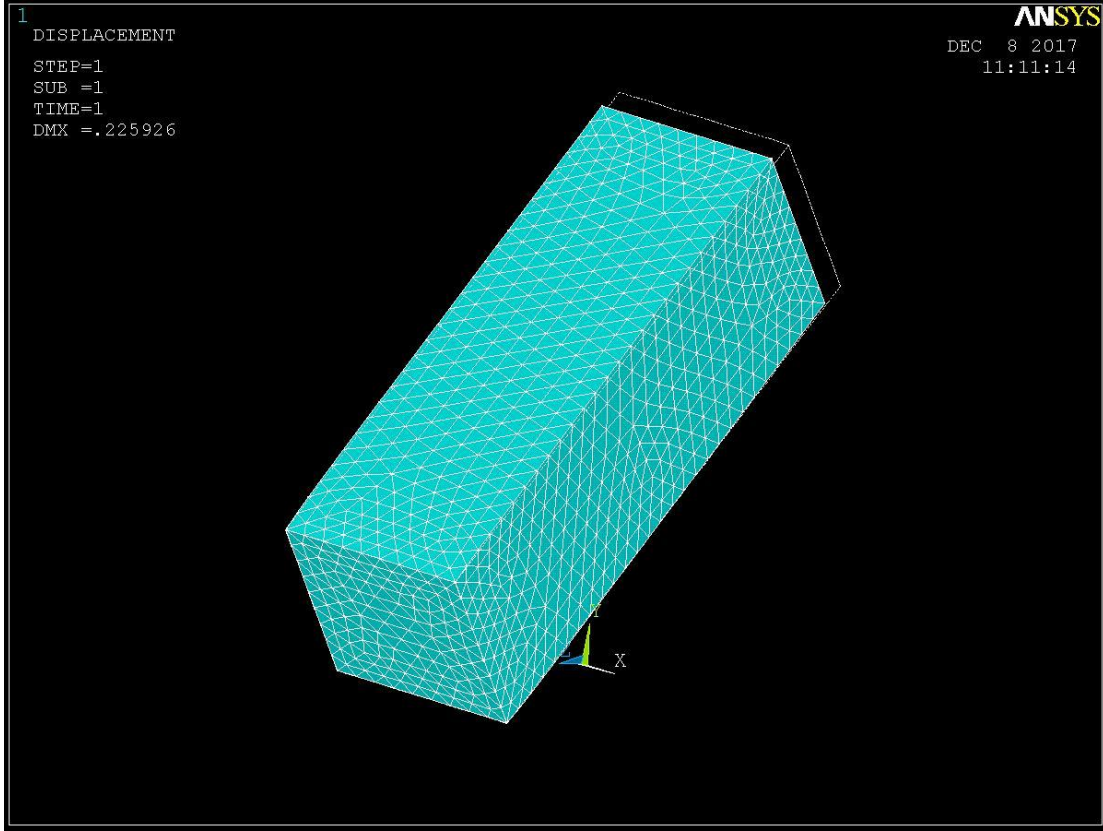


Şekil 3.53. Sarıçam eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (kısalma) verileri.



Şekil 3.54. Sarıçam eksen dışı LT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değiştirme (genişleme) verileri.

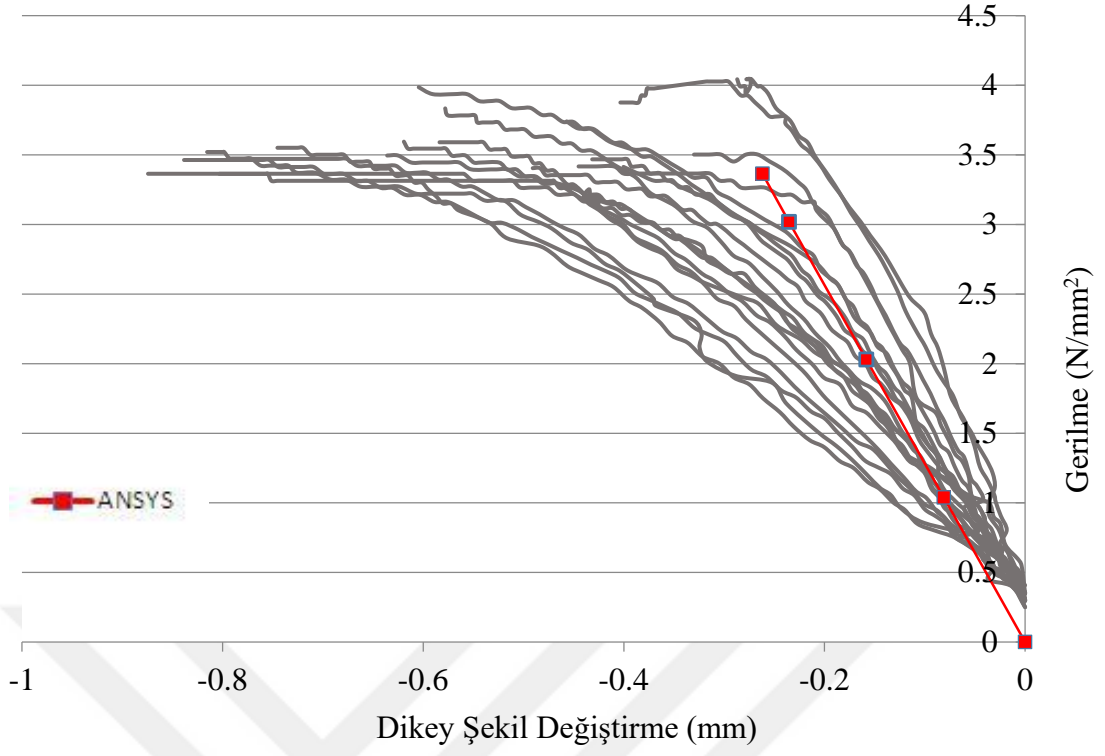
Sarıçam RT45 basma SE modellemesinin yapısal şekil değiştirme davranışı ve gerilme-şekil değiştirme sonuçları, sırasıyla Şekil 3.55 ve Çizelge 3.106’da görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen lineer elastik doğru ile statik test sonucu elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, Şekil 3.56 ve Şekil 3.57’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



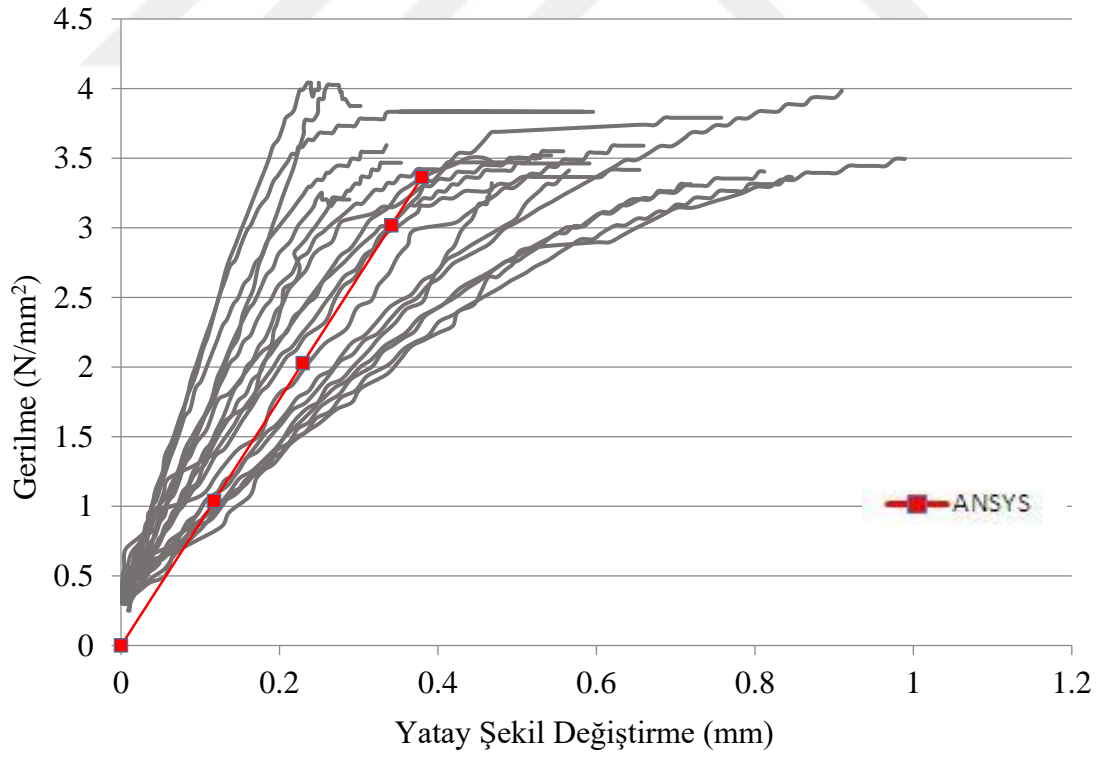
Şekil 3.55. Sarıçam RT45 SE Modelinde şekil değiştirme durumu.

Çizelge 3.106. Sarıçam RT45 SE modellemesi gerilme-şekil değiştirme verileri.

Dikey şekil değiştirme (Kısalma) (mm)	0	-0,08102	-0,15815	-0,23527	-0,26176
Yatay şekil değiştirme (Genişleme) (mm)	0	0,117482	0,229315	0,341149	0,379556
Gerilme (N/mm ²)	0,00	1,04	2,03	3,02	3,36



Şekil 3.56. Sarıçam eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değişirme (kısalma) verileri.



Şekil 3.57. Sarıçam eksen dışı RT basma örneğinin karşılaştırmalı statik test ve SEA gerilme-şekil değişirme (genişleme) verileri.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mobilya mühendislik tasarımı gerçekleştirmeye olanak sağlayan fiziksel ve mekanik deneyler, önemli, ilk ve temel basamaklardandır [365]. Bu basamaklarda elde edilen verilerin kullanımıyla daha kaliteli ve ekonomik mobilyalar üretilebilir [367] zira sağlam ve güvenilir mobilya için test ve değerlendirmeler gereklidir [483]. Bu verilerin kullanımı, ahşap yapıların tasarımında daha da önemli hale gelmektedir çünkü bu yapıların kullanım ömrü boyunca sağlamlığını ve güvenliğini sağlayabilmek mühendisliğin temel amaçlarından biridir. Dolayısıyla mühendislik hesaplarında kullanılmak üzere veri elde etmek için gerçekleştirilen testler, her ne kadar ilk basamaklardan biri olarak değerlendirilse de ahşap yapıların yerinde güvenle işlevlerini yerine getirip getirmediğinin kontrolü de sağlanmalıdır. Bu aşamada tahribatlı testlerden ziyade tahribatsız testler kullanışlı olmaktadır çünkü yapı bileşenleri üzerinden herhangi bir numune almadan doğrudan ölçüm yapılabilmektedir. Kesme modülü de yapısal tasarımların elastik davranışını belirleyen önemli bir özelliktir. Kollmann vd. [484] kesme modülü ve kesme direncinin, yapısal tasarımlar için öncelikle bilinmesi gereken mekanik özellikler olduğunu belirtmiştir. Bu bakış açısıyla sarıçam, karaçam ve kızılçam odunlarının rutubete bağlı kesme modüllerinin tahribatlı olarak belirlenmesi ve tahribatsız tahminin de gerçeğe yakın olarak yapılabildiğinin ortaya konulması önem arz etmektedir.

Roohania ve Kohantorabi [172]'ye göre odunun ortotropik kesme modülü tahmininde kullanılan ticari cihazlar, ne tam anlamıyla doğru ne de standarttır. Literatürdeki aynı türe ait çok farklı kesme modülü değerleri, kısmen bu açıklamayla aydınlatılabilir. Ayrıca aynı tür olsa bile her bir ağacın eşsiz oluşunun ve çevresel faktörlerin çeşitliliği ve zamana bağlı değişimi de bu değerlerin farklılaşmasına neden olabilir.

Spycher vd. [485]'ne göre kesme modülündeki %20'lik fark dinamik Young's modülünde %0.5'den az bir değişime neden olmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma ile elde edilen kesme modülleri kullanılarak Young's modülü değerleri de hesaplanabilecektir.

Birçok NDT tekniğinde, mazlemeyi test etmeden önce sistemin bütün olarak simüle edilmesi gereklidir. Çünkü birçok parametrenin ölçümlerde elde edilen bilgiyi

maksimize etmek için kalibre edilmesi gereklidir [99]. Bu çalışmadaki parametreler, sarıçam, karaçam ve kızılçam odunlardan hazırlanan 20mm'lik ve 70mm'lik küplerle gerçekleştirilen ön denemeler sonucu belirlenmiştir. Bunun yanında odunun L, R ve T yönlerinde yayılım yapan ultrasonik dalganın dB (desibel) ve range gibi parameterleri ölçüm esnasında dinamik olarak değiştirilmiştir.

Chen [114]'e göre ultrasonik yöntemler, yetenekleri, esneklikleri ve görece maliyet verimlilikleri nedeni ile en popüler NDT yöntemleridir. Fakat Bachtiar vd. [192] ağaç malzemenin doğal homojen olmaması ve katılık matrisinin çevrilmesi esnasında ortaya çıkan sorunlar gibi etkenlerin önemine değinmiştir. Bu gibi etkenlerin ultrasonik verilerin olduğundan yüksek tahmin edilmesine neden olmada hayati rol oynayabileceği ama bu etkilerin Young's ve kesme modülü tahmininde göz ardı edilebileceği belirtilmiştir. Zira kesme modülünün, ultrasonik ölçümlerle olabildiğince yakın değerlerde tahmin edilebileceği belirtilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, ultrasonik yöntemin odunun kesme modülünü belirlemede makul sapma değerleri (en fazla %15,18 fark) ile statik test yerine kullanılabilceğini ortaya koymuştur.

USDA [22]'ya göre ahşap malzemenin mekanik özellikleri üzerine etki eden en önemli faktörlerden biri de rutubettir. Dolayısı ile gerek yapısal amaçla gerekse mobilya konstrüksiyonunda kullanılacak odunun elastik davranışı, çevre koşullarına bağlı olarak değişecektir. Yapısal amaçla kullanılan ahşapta kesme modülü malzemenin elastik davranışını belirleyen temel sabitlerdendir. Bu çalışma ile kızılçam, karaçam ve sarıçam odununun kesme modülü ve bunun rutubete bağlı değişimi belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre kesme modülü, bağıl nemin %45'den %65'e geçişi neticesinde meydana gelen rutubet içeriği değişimiyle yüksek oranda düşerken %75 ve %85'e geçişi sonucu meydana gelen rutubet içeriği artışı ile daha az oranda düşüş göstermiştir. Bu durum Bachtiar vd. [192]'nde belirtilen davranış ile benzerlik göstermiştir.

Bazı bilgisayar destekli yazılımlarda ağaç malzemenin 3B ortotropik modellenmesinde kesmede akmanın başladığı gerilme sınırı da gereklidir. Bu çalışma ile kızılçam, karaçam ve sarıçam odunlarının rutubete bağlı kesme gerilme sınırları da belirlenmiştir. Kesme modülünde olduğu gibi kesme gerilme sınırları da rutubete bağlı olarak düşmüştür. En fazla düşüşler bağıl nemin %45'den %65'e geçişiyle gözlemlenmişken %75 ve %85'e doğru artan rutubet içeriği ile nispeten daha az düşüşler gözlenmiştir. Ağaç malzemenin SE modellenmesinde lineer elastik bölge, plastisite, transvers izotropik plastisite, Hill yield ölçütü gibi birçok teori mevcuttur ve seçilen teoriye göre model

farklı davranışlar sergiler. Bu çalışmada eksen dışı basma örnekleri, lineer elastik ortotropik olarak üç boyutlu modellenmiştir. Zira statik kesme modülü gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin lineer elastik bölgelerinden hesaplanmıştır. Dolayısı ile SEA ile elde edilen lineer elastik ortotropik gerilme-şekil değiştirme verileri, eksen dışı basma testi ile elde edilenler eğrilerin lineer elastik bölgeleri ile karşılaştırılabilmiştir. ANSYS ile gerçekleştirilen SEA sonuçları, statik testler ile elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri ile bazı tür ve yönlerde göz ardı edilebilecek farklılıklar gösterse de uyum göstermiştir. Bu küçük farklılıklar, modellemede kullanılan lineer ortotropik malzeme özelliklerinden Young's modülleri ve Poisson oranlarının literatürden alınmış olmasına bağlanabilir. Zira bu verilerin bu çalışmada kullanılan örnekleri tam olarak temsil edemediği düşünülebilir. Dolayısı ile modellemede kullanılan tüm parametrelerin birbirini ve nihayetinde sonuçları etkileyebileceği göz ardı edilmemeli ve karşılaştırmalı modellemeler için gerekli tüm parametrelerin aynı test örneklerinden elde edilmesi sağlanabilmelidir. Ağaç malzemenin gerçeğe yakın davranışını belirleyebilmek için bi-linear, multi-linear ya da non-linear davranış analizi için ileri çalışmalar gerçekleştirilmelidir. Bu çalışma kesme modülü davranışını ortaya koymayı amaçladığı için bu durumu incelememiştir. Fakat bunun için gerekli olan rutubete bağlı kesme modülü ve kesme gerilme sınırı gibi temel parametreler ortaya konulmuştur. Ayrıca bu çalışmada sadece %65 bağıl nemdeki veriler için SEA gerçekleştirilmiş olup diğer bağıl nem grupları için ayrı bir çalışma gerçekleştirilecektir.

Hasegawa ve Matsumura [458]'ya göre çok az çalışma kesme dalgasının rutubet içeriği ile ilişkisi üzerine odaklanmıştır. Türkiye'nin asli ağaç türleri olan kızılçam, karaçam ve sarıçam odunlarının rutubete bağlı kesme modülleriyle ilgili çalışmalar literatürde olmamakla birlikte bunlarla ilgili bazı bilgiler, ön çalışmalar ve yayınlarla literatüre kazandırılmıştır. Dolayısıyla verilerin tartışılması çalışmanın sınırlılığı olarak görünse de rutubete bağlı kesme modüllerinin literatüre kazandırılması önemlidir.

Kesme modülü ve kesmede akma gerilmesi, yapısal tasarımların hesabında önemlidir [18] ve bu çalışma ile sarıçam, karaçam ve kızılçam odunları kullanılarak gerçekleştirilecek tasarımların hesabında gerekli olan bu veriler elde edilmiştir. Ayrıca mekanik davranışı önemli derecede etkileyen çevresel faktörlerden biri olan rutubetin bu değerler üzerine etkisinin de ortaya konulması ile tasarımların kullanım yerindeki rutubet içeriği değişimi ile etkileşimli davranışı da tasarımlarda dikkate alınabilecektir.

Ultrasonik kesme dalgası, odun gibi ortotropik yapıya sahip malzemelerde yöne bağlı

olarak farklı yayılım özellikleri gösterir. Bu çalışma ile L doğrultusundaki ultrasonik dalga hızının en yüksek hız olduğu ve R ve T doğrultularında ise hızın 2-2,5 kat daha yavaş olduğu belirlenmiştir.

Ultrasonik dalga hızı, Ayan [107]'in belirttiği gibi ağaç türü, lif yönü, yıllık halka, hücre çeperi ve hava boşluğu oranı, rutubet miktarı, sıcaklık, yoğunluk ve frekans gibi birçok parameterden etkilenmektedir. Bu çalışmada rutubet içeriğinin etkisi ortaya konulmuştur. Odunun rutubet içeriğini artışı ile ultrasonik dalga hızlarında kayda değer düşüşlerin olduğu belirlenmiştir.

Literatürde yoğunluğun ultrasonik dalga üzerine yaptığı etki hakkında olumlu ve olumsuz görüşlerin yanında herhangi bir etki yapmadığını belirten görüşler de mevcuttur. Bu çalışmada rutubet içeriğinin artışı ile birlikte örneklerde yoğunluk artışı da meydana gelmiştir. Fakat bunun ultrasonik dalga hızı üzerine olumlu ya da olumsuz herhangi bir etkisi olduğu ortaya konulamamıştır. Bazı kaynaklarda etkileşimli etkinin sonucu olarak ses hızında değişimlerin olduğu belirtilmiştir. Bu konunun farklı çalışmalar ile ortaya konulması bu anlamda literatüre katkı sağlayacaktır.

Baradit vd. [186] ölçümlerde bir sıkıştırma aparatı kullanmış ve bu, tüm örneklerde sabit bir temas basıncı sağlamıştır. Bu çalışmada transdüserler malzemeye parmak ucu ile uygulanan basınç ile temas ettirilmiştir. Bu uygulamanın temas basıncında eş olmayan sonuçların oluşmasına neden olduğu düşünülse de testler esnasında bu durumun ölçümlerde kayda değer bir farklılığa neden olmadığı görülmüştür. Fakat böyle bir mekanizma kullanılmasının ölçümleri kolaylaştıracağı göz önüne alınabilir.

Ultrasonik dalgalar, yayılım yaptığı malzemenin yığın özelliklerine zarar vermezler. Dolayısı ile ultrasonik ölçümler ile ağaç malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişime neden olmadan gerek test örnekleri gerekse de kullanımda olan yapı bileşenlerinin tahribatsız muayenesi yapılabilir. Bu durum özellikle tarihi eserlerin tahribatsız olarak incelenmesinde anlam kazanabilir.

Ayrıca, silindirik formu olan odunu, dikdörtgen vd. geometrik şekillere dönüştürmek [198] odun yapısında süreksizliğe neden olan ve odunun doğasına etki eden temel bir etken olarak düşünülmelidir.

Bu çalışmanın tamamlayıcı yanı olarak sarıçam, karaçam ve kızılçam odunlarının sıcaklığa bağlı kesme modülünün belirlenmesi, bir sonraki çalışma olarak gerçekleştirilip literatüre katkısı sağlanmalıdır.

5. KAYNAKLAR

- [1] M. A. Martinez, P. Poletti, and L. Espert, "Vibration testing for the evaluation of the effects of moisture content on the in-plane elastic constants of wood used in musical instruments," in *Vibration And Structural Acoustics Analysis: Current Research And Related Technologies*, C. M. Vasques and J. Dias Rodrigues, Eds. Dordrecht, Holland: Springer, 2011, pp. 21–57.
- [2] A. Mortensen, *Concise Encyclopedia of Composite Materials*, 2nd Ed. Amsterdam, Holland: Elsevier, 2006.
- [3] P. Sinha, *Composite Materials and Structures*, E-Book Ed. Kharagpur, India: Composite Centre of Excellence, AR & DB, Department of Aerospace Engineering I.I.T. Kharagpur, 2006.
- [4] M. Fujita and H. Harada, "Ultrastructure and formation of wood cell wall," in *Wood And Cellulosic Chemistry*, 2nd Edition., D. Hon and N. Shiraishi, Eds. New York, USA: Marcel Dekker, 2001, pp. 1–50.
- [5] H. Core, W. Cote, and A. Day, *Wood Structure and Identification*, 2nd. Ed. New York, USA: Syracuse University Press, 1979.
- [6] A. J. Ahao, J. Rekola, J. Matinlinna, J. Gunn, T. Tirri, P. Viitaniemi, and P. Vallittu, "Natural composite of wood as replacement material for osteochondral bone defects," *Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials*, vol. 83, no. 1, pp. 64–71, 2007.
- [7] P. Calvert, "Biomimetic materials: Properties and processing," in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 2nd Ed., K. H. Buschow, Ed. London, England: Elsevier, 2007, pp. 1–8.
- [8] J. Hong, J. Lee, H. Yeo, C. Kim, J. Pang, and J. Oh, "Parametric study on the capability of threedimensional finite element analysis (3D-FEA) of compressive behaviour of Douglas fir," *Holzforschung*, vol. 70, no. 6, pp. 539–546, 2016.
- [9] J. Bodig and B. Jayne, *Mechanics of Wood and Wood Composites*, 1st Ed. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1982.
- [10] J. Dinwoodie, *Timber: Its Nature and Behavior*. London, England: E and FN Spon, 2000.
- [11] S. Clauß, C. Pescatore, and P. Niemz, "Anisotropic elastic properties of common ash (*Fraxinus excelsior* L.)," *Holzforschung*, vol. 68, no. 8, pp. 941–949, 2014.
- [12] *Odunda fiziksel ve mekaniksel deneyler için numune alma metotları ve genel özellikler*, Türk Standardları Enstitüsü TS2470, 2005.
- [13] *Odunda, fiziksel ve mekaniksel deneyler için birim hacim ağırlığı tayini*, Türk Standardları Enstitüsü TS2472, 2005.
- [14] *Odunda, fiziksel ve mekaniksel deneyler için rutubet miktarı tayini*, Türk Standardları Enstitüsü TS2471, 2005.

- [15] *Non-destructive testing - Characterization and verification of ultrasonic examination equipment - Part 1: Instruments*, European Committee for Standardization EN12668-1, 2010.
- [16] U. Dackermann, R. Elsener, J. Li, and K. Crews, “A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood,” *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 963–976, 2016.
- [17] M. Ritter, *Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance*. Washington, USA: USDA Forest Service, 1990.
- [18] K. Onaran, *Malzeme Bilimi*. İstanbul, Türkiye: Bilim Teknik Yayınevi, 2006.
- [19] R. Hoadley, *Understanding Wood: A Craftsman’s Guide to Wood Technology*. Newton, USA: The Taunton Press, 2000.
- [20] Z. Cai and R. Ross, “Mechanical properties of wood-based composite materials,” in *Wood Handbook Wood as an Engineering Material*, Centennial., R. Ross, Ed. Wisconsin, USA: USDA Forest Product Laboratory, 2010, pp. 12-1–12.
- [21] A. Bozkurt ve N. Erdin, *Ağaç Teknolojisi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Basımevi ve Film Merkezi, 1997.
- [22] USDA, *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*, Centennial. Madison, USA: USDA Forest Products Laboratory, 2010.
- [23] H. Warren, *Oxford Türkiye: Sözlük İngilizce-Türkçe*. Oxford, England: Oxford University Press, 2010.
- [24] R. S. of Chemistry, (2016, Aug 10). *Composite materials, advancing the chemical science* [Online]. Available: <http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/Inspirational/resources/4.3.1.pdf>.
- [25] Anonym. (2016, Apr 12). *Chapter 17. Composites* (The toolkit MSE-209-3, 2004). [Online]. Available: <http://www.virginia.edu/bohr/mse209/chapter17.htm>.
- [26] Ç. Dinçkal, “Analysis of elastic anisotropy of wood material for engineering applications,” *Journal of Innovative Research in Engineering Sciences*, vol. 2, no. 2, pp. 67–80, 2011.
- [27] W. Simpson and A. TenWolde, “Physical properties and moisture relation of wood,” in *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*, R. Ross, Ed. Madison, USA: USDA Forest Product Laboratory, 1999, p. 3:3-8.
- [28] U. Riedel and J. Nickel, “Applications of natural fiber composites for constructive parts in aerospace, automobiles, and other area,” *Biopolymers*, vol. 10, pp. 1–28, 2002.
- [29] M. Güner ve V. Süme, *Yapı Malzemesi ve Beton*, 2. Baskı. İstanbul, Türkiye: Aktif Yayınevi, 2000.
- [30] M. Eriç, *Yapı Fiziği ve Malzemesi*. İstanbul, Türkiye: Literatür Yayıncılık, 1994.
- [31] H. Demiray, *Mukavemet, Katı Cisimlerin Mekaniğine Giriş*. İstanbul, Türkiye: Çağlayan Kitabevi, 1990.
- [32] D. Kretschmann, “Mechanical properties of wood,” in *Wood Handbook Wood as*

- an Engineering Material, Centennial.*, R. Ross, Ed. Wisconsin, USA: USDA Forest Product Laboratory, 2010, p. 5/1-46.
- [33] A. Bozkurt ve Y. Göker, *Fiziksel ve Mekanik Ağaç Teknolojisi Ders Kitabı*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi, 1996.
- [34] Anonym. (2016, Jan 15). *Shear modulus* [Online]. Available: <https://faraday.physics.utoronto.ca/PHY182S/WilberforceRefShear.pdf>.
- [35] C. C. Gerhards, "Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects," *October*, vol. 14, no. 1, pp. 4–36, 1982.
- [36] J. Bodig and B. Jayne, *Mechanics of Wood and Wood Composites*, 2nd Ed. Malabar, USA: Krieger, 1993.
- [37] Anonym. (2016, June 11) *Poisson's ratio - Basics of mechanical engineering* [Online]. Available: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/1764-poissons-ratio-basics-of-mechanical-engineering>.
- [38] F. F. Kollmann and W. Cote, *Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1968.
- [39] Anonym. (2016, July 21). *Toughness: Torsion* [Online]. Available: <http://chestofbooks.com/home-improvement/woodworking/Mechanical-Properties-of-Wood/Toughness-Torsion.html>.
- [40] A. Berkel, *Ağaç Malzeme Teknolojisi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi, 1970.
- [41] J. Haygreen and J. Bowyer, *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. Ames, USA: Iowa State University Press, 1982.
- [42] N. As, T. Dündar ve Ü. Büyüksarı, "Budakların odunun fiziksel ve mekanik özellikler üzerine etkileri," *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 58, s. 2, ss. 1–13, 2008.
- [43] Y. Bozkurt, *Ağaç Teknolojisi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi, 1986.
- [44] A. Doğu, "Odun yapısı üzerinde etkili faktörler," *Doğu Akdeniz Orman Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Dergisi*, c. 8, ss.1-10, 2014.
- [45] T. J. Wodzicki, "Natural factors affecting wood structure," *Wood Science and Technology*, vol. 35, no. 1–2, pp. 5–26, 2001.
- [46] A. Kurtoğlu, "Odunun rutubet halleri," *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 33, c. 2, ss. 168–183, 1983.
- [47] A. Kurtoğlu, "Türkiye’de ağaç malzemenin denge rutubeti miktarları," *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 35, s. 2, ss. 106–118, 1985.
- [48] T. Ozyhar, "Moisture and time-dependent orthotropic mechanical characterization of Beech wood," Ph.D. dissertation, Institute for Building Materials, ETH Zürich, Zürich, Switzerland, 2013.
- [49] A. Panshin and C. De Zeeuw, *Textbook of Wood Technology*. New York, USA: McGraw-Hill, 1980.
- [50] D. Green, B. Shelley, and H. Vokey, "In-grade testing of structural lumber," *In-*

grade Testing Committee and Forest Products Society Workshop, Madison, USA, 1989, pp. 1-110.

- [51] N. Matan and B. Kyokong, "Effect of moisture content on some physical and mechanical properties of juvenile rubberwood (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.)," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 327-340, 2003.
- [52] D. E. Kretschmann and D. W. Green, "Modeling moisture content-mechanical property relationships for clear Southern Pine," *Wood and Fiber Science*, vol. 28, no. 3, pp. 320-337, 1996.
- [53] T. Ozyhar *et al.*, "Orthotropic hygric and mechanical material properties of oak wood," *Wood Material Science and Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 36-45, 2016.
- [54] S. Hering, D. Keunecke, and P. Niemz, "Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood," *Wood Science and Technology*, vol. 46, no. 5, pp. 927-938, 2012.
- [55] S. Ishida, "The effect of temperature on the strength of wood," *Hokkaido University Res Bull College Exp Forests*, vol. 17, no. 1, pp. 1-14, 1954.
- [56] K. Kitahara and A. Suematsu, "The influence of temperature on compressive properties of wood," *Japan Wood Research Society*, vol. 1, no. 2, pp. 47-51, 1955.
- [57] R. Knudson and A. Schiewind, "Performance of structural wood members exposed to fire," *Forest Products*, vol. 25, no. 2, pp. 23-32, 1975.
- [58] F. Kollmann, "The mechanical properties of wood of different moisture content within -200° to +200°C temperature range," *VDI-Forschungsheft*, vol. 403, no. XI, pp. 1-18, 1940.
- [59] E. Schaffer, "Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strength of dry Douglas-Fir," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 1, no. 4, pp. 319-329, 1973.
- [60] P. Sulzberger, "The Effect of temperature on the strength of wood, plywood and glue joints," Aeronautical Research Consultative Committee, Melbourne, Australia, ACA-46, 1953.
- [61] P. Bekhta and P. Niemz, "Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of Spruce wood," *Holzforschung*, vol. 57, no. 5, pp. 539-546, 2003.
- [62] G. Bernier and D. Kline, "Dynamic mechanical behavior of birch compared with Methylmethacrylate impregnated birch from 90° to 475° K," *Forest Products*, vol. 18, no. 4, pp. 79-82, 1968.
- [63] K. Kitahara and T. Matsumoto, "Temperature dependence of dynamic mechanical loss of wood," *Japan Wood Research Society*, vol. 20, no. 8, pp. 349-354, 1974.
- [64] E. Schaffer, "Elevated temperature effect on the longitudinal mechanical properties of wood," Ph.D. dissertation, Department of Engineering Mechanics, University of Wisconsin, Madison, USA, 1970.
- [65] E. Sellevold, F. Radjy, P. Hoffmeyer, and L. Bach, "Low temperature internal friction and dynamic modulus for beech wood," *Wood and Fiber Science*, vol.

- 7, no. 3, pp. 162–169, 1975.
- [66] F. Kollmann, “The dependence of the elastic properties of wood on temperature,” *Holz Als Roh Und Werkstoff*, vol. 18, no. 8, pp. 308–314, 1960.
- [67] M. Partl and H. Strassler, “Effect of temperature on the static and impact bending behavior of spruce wood,” *Holzforsch und Holzverwertung*, vol. 29, no. 5, pp. 94-101, 1977.
- [68] T. Okuyama, “Effect of strain rate on mechanical properties of wood. IV. on the influence of the rate of deflection and the temperature to bending strength of wood. V. On the influence of the temperature to impact bending strength,” *Japan Wood Research Society*, vol. 20, no. 5, pp. 210-216, 1974.
- [69] T. Okuyama, “Effect of strain rate on mechanical properties of wood. IV. On the influence of the rate of deflection and the temperature to bending strength of wood. V. On the influence of the temperature to impact bending strength,” *Japan Wood Research Society*, vol. 21, no. 4, pp. 212-216, 1975.
- [70] A. Comben, “The Effect of low temperatures on the strength and elastic properties of timber,” *Journal of the Institute of Wood Science*, vol. 13, pp. 44–55, 1964.
- [71] W. L. James, “Effect of temperature and moisture content on internal friction and speed of sound in Douglas-fir,” *Forest Products*, vol. 11, no. 9, pp. 383-390, 1961.
- [72] R. Preusser, “Plastic and elastic behavior of wood affected by heat in open systems,” *Holztechnologie*, vol. 9, no. 4, pp. 229–231, 1968.
- [73] T. H. Yang, F. Chang, C. Lin, and F. Chang, “Heat-treated Japanese Cedar,” *BioResources*, vol. 11, no. 2, pp. 3947-3963, 2016.
- [74] D. Gardner, C. Tascioğlu, and M. E. Walinder, “Wood composite protection,” in *Wood Deterioration and Preservation*, B. Goodell, Ed. Detroit: American Chemical Society, 2003, pp. 399–419.
- [75] L. Reinprecht, *Wood Deterioration, Protection and Maintenance*, 1st Ed. West Sussex, England: JohnWiley and Sons, 2016.
- [76] V. Bucur, “Ageing of wood,” in *Handbook of Materials for String Musical Instruments*, 1st Ed., Cham, Germany: Springer, 2016, pp. 283–323.
- [77] V. Bucur, “Ageing of musical instruments-About the ‘old’ and ‘new violins,’” in *Handbook of Materials for String Musical Instruments*, 1st Ed., Cham, Germany: Springer, 2016, pp. 325–372.
- [78] R. Gillespie, “Accelerated aging of wood-based panel products: A review and commentar,” *Workshop on Durability*, Florida, USA, 1982, pp. 11–26.
- [79] J. Crump, “Simultaneous determination of moisture content and density by radiation methods,” *Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Madison, USA, 1964, p. 17.
- [80] W. Loss, “Determination of moisture content and density of wood by radiation methods,” *Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Madison, USA, 1964, p. 18.
- [81] R. Byrne and F. Drew, “Detection of decay and voids in wood by radiation

- methods,” *Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Madison, USA, 1964, p. 19.
- [82] USDA, *The Encyclopedia of Wood*, New York, USA: Skyhorse Publishing, 2007, pp. 496.
- [83] W. W. Wilcox, “Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength,” *Wood and Fiber Science*, vol. 9, no. 4, pp. 252–257, 1978.
- [84] R. Zabel and J. Morrell, *Wood Microbiology: Decay and Its Prevention*. San Diego, USA: Academic Press, 1992, pp. 498.
- [85] D. Nicholas and D. Crawford, “Concepts in the development of new accelerated test methods for wood decay,” in *Wood Deterioration and Preservation*, B. Goodell, D. Nicholas, and T. Schultz, Eds. Washington, USA: American Chemical Society, 2003, pp. 288–312.
- [86] O. Schmidt, *Wood and Tree Fungi: Biology, Damage, Protection, and Use*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [87] A. P. Schniewind and J. D. Barrett, “Wood as a linear orthotropic viscoelastic material,” *Wood Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 43–57, 1972.
- [88] R. Lakes, *Viscoelastic Materials*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2009.
- [89] T. Ozyhar, S. Hering, and P. Niemz, “Viscoelastic characterization of wood: Time dependence of the orthotropic compliance in tension and compression,” *Journal of Rheology*, vol. 57, no. 2, pp. 699–717, 2013.
- [90] W. Clouser, “Creep of small wood beams under constant ending load,” USDA Forest Product Laboratory, Madison, USA, Rep. 2150, 1959.
- [91] P. Navi and S. Stanzl-Tschegg, “Micromechanics of creep and relaxation of wood. A review COST Action E35 2004-2008: Wood machining micromechanics and fracture,” *Holzforschung*, vol. 63, no. 2, pp. 186-195, 2008.
- [92] A. Sadeghi Alavijeh, R. M. H. Khorasany, A. Habisch, G. G. Wang, and E. Kjeang, “Creep properties of catalyst coated membranes for polymer electrolyte fuel cells,” *Power Sources*, vol. 285, pp. 16-28, 2015.
- [93] Z. Bao, C. Eckelman, and H. Gibson, “Fatigue strength and allowable design stresses for some wood composites used in furniture,” *Holz als Roh und Werkstoff*, vol. 54, no. 6, pp. 377–382, 1996.
- [94] I. Smith, E. Landis, and M. Gong, *Fracture and Fatigue in Wood*. West Sussex, England: John Wiley and Sons, 2003.
- [95] F. Beall, “Future of nondestructive evaluation of wood and wood-based materials,” *Holzforsch Holzverwert*, vol. 5, no. 1, pp. 73-75, 1996.
- [96] V. Bucur, *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
- [97] M. E. Shanahan, “Materials and mechanical aspects of bonded joints,” in *Ultrasonic Wave Propagation in Non Homogeneous Media*, A. Leger and M. Deschamps, Eds. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009, pp. 39-47.
- [98] W. Galligan and K. McDonald, “Machine grading of lumber. Practical concerns for lumber producers,” USDA Forest Service, Forest Products Laboratory,

Wisconsin, USA, Rep. FPL-GTR-7, 2000.

- [99] S. Carcangiu, A. Montisci, and M. Usai, “Modeling ultrasounds for nondestructive testing applications,” in *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems: Industrial Application Issues*, P. Burrascano, S. Callegari, A. Montisci, M. Ricci, and V. Mario, Eds. Switzerland: Springer International, 2015, pp. 47–82.
- [100] Wikipedia. (2016, Oct 17). *Nondestructive testing* [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Nondestructive_testing.
- [101] N. Sobue, “Simulation study on stress wave velocity in wood above fiber saturation point,” *Mokuzai Gakkaishi*, vol. 39, no. 3, pp. 271–276, 1993.
- [102] P. Niemz, “Methods of non-destructive wood testing,” in *Wood Science for Conservation of Cultural Heritage*, G. Joseph, Ed. Firenze, Italy: Firenze University Press, 2010, pp. 163–168.
- [103] R. Berg. (2016, Mar 18). *Ultrasonics* [Online]. Available: <http://global.britannica.com/science/ultrasonics>.
- [104] K. Langenberg, R. Marklein, and K. Mayer, *Ultrasonic Nondestructive Testing of Materials: Theoretical Foundations*. Florida, USA: CRC Press, 2012.
- [105] V. Bucur, *Acoustics of Wood*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [106] J. Björnberg, “Comparison of non-destructive techniques to discover defect finger joints in furniture,” BSc thesis, Department of Forestry and Wood Technology, Linnaeus University, Växjö, Sweden, 2014.
- [107] S. Ayan, “Isıl işlemlerle ahşap lamine panellerin akustik özelliklerinin belirlenmesi,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [108] Anonym. (2016, Oct 26). *Waves* [Online]. Available: <http://faculty.wcas.northwestern.edu/~infocom/Ideas/graphics/waves.jpg>.
- [109] L. Schmerr, “Fundamental models and measurements for ultrasonic nondestructive evaluation systems,” in *Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization*, C. Chen, Ed. Singapore: World Scientific Publishing, 2007, p. 684.
- [110] M. Berke, “Nondestructive material testing with ultrasonics,” *Krautkrämer Gesellschaft mit beschränkter Haftung & Compagnie*, vol. 5, no. 9, 2000.
- [111] S. Dahmen, H. Ketata, M. H. Ben Ghazlen, and B. Hosten, “Elastic constants measurement of anisotropic Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave,” *Ultrasonics*, vol. 50, no. 4–5, pp. 502–507, 2010.
- [112] R. F. Hearmon, *An Introduction to Applied Anisotropic Elasticity*, 1st Ed. Oxford, England: Oxford University Press, 1961.
- [113] M. J. Musgrave, *Crystal Acoustics: Introduction to The Study of Elastic Waves and Vibrations in Crystals*. San Francisco, USA: Acoustical Society of America, 1970.
- [114] C. Chen, *Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and*

- Material Characterization*, 1st Ed. Singapore: World Scientific Publishing, 2007.
- [115] *Natural stone test methods-determination of sound speed propagation*, International Organization for Standardization UNI EN 14579, 2004.
- [116] S. H. Aziz, A. Shaari, S. Hafzan, M. N. Ahmad, A. İbrahim, and İ. M. Z. Abidin, “Elastic studies of tropical wood by using non-destructive ultrasonic technique,” *Malaysia International NDT Conference and Exhibition*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2013, pp.
- [117] I. Steinkamp, *User Handbook for Ultrasonic Test Instrument Type BP5*. Warendorf, Germany: Steinkamp Gesellschaft mit beschränkter Haftung und Compagnie Kommanditgesellschaft, 1995.
- [118] J. Krautkraemer and H. Krautkraemer, *Ultrasonic Testing of Materials*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1990.
- [119] E. Czerlinsky, “Non-destructive plywood testing with ultrasound,” *Dt. Luftfahrtforschung, Deutschland, Unters. u. Mitt. Nr. 1042*, 1943.
- [120] I. Lee, “A non-destructive method for measuring the elastic anisotropy of wood using an ultrasonic pulse technique,” *Journal of the Institute of Wood Science*, vol. 43, no. 1, pp. 1-15, 1958.
- [121] P. Mazzanti and L. Uzielli, “Strength and MOE of poplar wood (*Populus alba* L.) across the grain: experimental data,” *Wood Science for Conservation of Cultural Heritage*, Braga, Portugal, 2010, pp. 62-66.
- [122] L. G. Esteban, F. G. Fernández, and P. de Palacios, “MOE prediction in *Abies pinsapo* Boiss. timber: Application of an artificial neural network using non-destructive testing,” *Computers and Structures*, vol. 87, no. 21-22, pp. 1360-1365, 2009.
- [123] Ç. Cansu, “Ultras ses ile ağaçların bazı fiziksel özelliklerinin belirlenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2008.
- [124] A. Hijazi. (2017, Sep 18). *Introduction to non-destructive testing techniques* [Online]. Available: [https://eis.hu.edu.jo/ACUuploads/10526/Ultrasonic Testing.pdf](https://eis.hu.edu.jo/ACUuploads/10526/Ultrasonic%20Testing.pdf).
- [125] Anonim. (2017, 11 Şubat). *Tahribatsız muayene yöntemleri* [Online]. Erişim: http://metalurji.kocaeli.edu.tr/metal/files/lab1/tahribatsiz_testler.pdf.
- [126] Y. Örs and H. Keskin, *Ağaç Malzeme Bilgisi*. İstanbul, Türkiye: Atlas Yayın Dağıtım, 2001.
- [127] K. Koç, K. Kızılkaya, E. Erdinler, and D. Korkut, “The use of finite element method in the furniture industry,” *African Journal of Business Management*, vol. 5, no. 3, pp. 855–865, 2011.
- [128] M. Bakioğlu, *Cisimlerin Mukavemeti*, 1. Baskı. İstanbul, Türkiye: Beta Yayın Dağıtım, 2001.
- [129] T. Mihailescu, “An investigation of the performance of mortise and tenon joints using the finite element method,” Ph.D. dissertation, Buckinghamshire Chilterns University, High Wycombe, England, 1998.
- [130] Z. W. Guan and P. D. Rodd, “A three-dimensional finite element model for

- locally reinforced timber joints made with hollow dowel fasteners,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 27, no. 4, pp. 785–797, 2000.
- [131] Z. Guan and P. Rodd, “Dvw-local reinforcement for timber joints,” *Journal of Structural Engineering*, no. 1996, pp. 894–900, 2001.
- [132] C. Guan, H. Zhang, J. F. Hunt, and H. Yan, “Determining shear modulus of thin wood composite materials using a cantilever beam vibration method,” *Construction and Building Materials*, vol. 121, pp. 285–289, 2016.
- [133] L. Pagnotta, “Recent progress in identification methods for the elastic characterization of materials,” *International Journal of Mechanics*, vol. 2, no. 4, pp. 129–140, 2008.
- [134] R. F. Hearmon, “The elasticity of wood and plywood,” His Majesty's Stationary Office, London, England, Forest Products Research Special Rep. 7, 1948.
- [135] D. Haines, “On musical instrument wood,” *Catgut Acoustical Society Newsletter*, vol. 1, no. 31, pp. 23–32, 1979.
- [136] N. Ghelmeziu and I. . Beldie, “On the characteristics of resonance spruce wood,” *Catgut Acoustical Society Newsletter*, vol. 17, pp. 10–16, 1972.
- [137] L. Hoefflin and S. Aicher, “Wave velocities in the radial-tangential growth plane of spruce and beech,” *International Conference on Wood and Fiber Composites*, Stuttgart, Germany, 2000, pp. 327–337.
- [138] J. F. Dumail, K. Olofsson, and L. Salmén, “An analysis of rolling shear of spruce wood by the Iosipescu method,” *Holzforschung*, vol. 54, no. 4, pp. 420–426, 2000.
- [139] A. Ylinen, “A comparative study of different types of shear tests of wood,” in *5th Conference of Wood Technology*, Madison, USA, 1963, p. 1.
- [140] A. Askenazi, *Anisotropy of Wood and Wood-Base Materials*, 1st. Moscow, Russia: Izdatelstvo Lesnaja Promuslennosty, 1976.
- [141] J. Liu, “New shear strength test for solid wood,” *Wood and Fiber Science*, vol. 8, no. 4, pp. 252–261, 1984.
- [142] E. M. Lang, “An alternative method for shear strength assessment,” *Forest Products*, vol. 47, no. 11–12, pp. 81–84, 1997.
- [143] C. Vázquez *et al.*, “Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods,” *Wood Science and Technology*, vol. 49, no. 3, pp. 607–622, 2015.
- [144] A. Sliker, Y. Yu, T. Weigel, and W. Zhang, “Orthotropic elastic constants for eastern hardwood species,” *Wood and Fiber Science*, vol. 26, no. 1, pp. 107–121, 1994.
- [145] J. Szalai, “Indirect determination of shearing strength of wood using the anisotropic strength theory,” *Holz Als Roh und Werkstoff*, vol. 50, no. 6, pp. 233–238, 1992.
- [146] J. Liu, D. Dwight, R. Flach, J. Ross, and G. Lichtenberg, “An improved shear test fixture using the Iosipescu specimen,” in *Mechanics of Cellulosic Materials*, New York, USA: The American Society of Mechanical Engineers, 1999, pp. 27–30.

- [147] F. Pierron, “Saint-Venant effects in the Iosipescu specimen,” *Journal of Composite Materials*, vol. 32, no. 22, pp. 1986–2015, 1998.
- [148] J. Y. Liu, “Analysis of off-axis tension test of wood specimens,” *Wood and Fiber Science*, vol. 34, no. 2, pp. 205–211, 2002.
- [149] F. De Magistris and L. Salmén, “Combined shear and compression analysis using a modified Iosipescu shear test device. Experimental studies on dry wood,” *Holzforschung*, vol. 59, no. 5, pp. 539–545, 2005.
- [150] M. Arcan, Z. Hashin, and A. Voloshin, “A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials - A specially designed specimen yields material properties under pure shear or uniform plane-stress conditions,” *Experimental Mechanics*, vol. 18, no. 4, pp. 141–146, 1978.
- [151] W. J. Zhang and A. Sliker, “Measuring shear moduli in wood with small tension and compression samples,” *Wood and Fiber Science*, vol. 23, no. 1, pp. 58–68, 1991.
- [152] Y. Nadir, P. Nagarajan, and A. J. Midhun, “Measuring elastic constants of *Hevea brasiliensis* using compression and Iosipescu shear test,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 72, no. 6, pp. 749–758, 2014.
- [153] N. Melin, “The modified Iosipescu shear test for orthotropic materials,” Ph.D. dissertation, Department of Solid Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2008.
- [154] J. Xavier, N. Garrido, M. Oliveira, J. Morais, P. Camanho, and F. Pierron, “A comparison between the iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of *Pinus Pinaster Ait.*,” *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 7–8, pp. 827–840, 2004.
- [155] J. Xavier, M. Oliveira, J. Morais, and T. Pinto, “Measurement of the shear properties of clear wood by the Arcan test,” *Holzforschung*, vol. 63, no. 2, pp. 217–225, 2009.
- [156] U. Müller, A. Ringhofer, R. Brandner, and G. Schickhofer, “Homogeneous shear stress field of wood in an Arcan shear test configuration measured by means of electronic speckle pattern interferometry: description of the test setup,” *Wood Science and Technology*, vol. 49, no. 6, pp. 1123–1136, 2015.
- [157] H. Yoshihara and A. Matsumoto, “Measurement of the shearing properties of wood by in-plane shear test using a thin specimen,” *Wood Science and Technology*, vol. 39, no. 2, pp. 141–152, 2005.
- [158] P. I. Semenov, “Determination of shear moduli of orthotropic materials from torsion tests,” *Polymer Mechanics*, vol. 2, no. 1, pp. 17–20, 1968.
- [159] Z. Wang, Y. Wang, Y. Cao, and Z. Wang, “Measurement of shear modulus of materials based on the torsional mode of cantilever plate,” *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 1059–1071, 2016.
- [160] J. Janowiak and R. Pellerin, “Shear moduli determination using torsional stiffness measurements,” *Wood and Fiber Science*, vol. 24, no. 4, pp. 392–400, 1992.
- [161] K. T. S. Hassan, P. Horacek, and J. Tippnera, “Evaluation of stiffness and strength of scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques,” *BioResources*, vol. 8, no. 2, pp. 1634–1645, 2013.

- [162] H. Yoshihara, "Shear modulus and shear strength evaluation of solid wood by a modified ISO 15310 square-plate twist method," *Drvna Industrija*, vol. 63, no. 1, pp. 51–55, 2012.
- [163] Z. Karasconyi, "Determination of shear moduli of wood using normal stress," *26th Danubia-Adria Symposium*, Leoben, Austria, 2009, p.
- [164] Y. Wu and Z. Shao, "Measurement and mechanical analysis of the strains–stresses induced by tree-pulling experiments in tree stems," *Trees*, vol. 30, no. 3, pp. 675–684, 2016.
- [165] G. Y. Jeong and M. J. Park, "Evaluate orthotropic properties of wood using digital image correlation," *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 864–869, 2016.
- [166] P. Niemz, T. Ozyhar, S. Hering, and W. Sonderegger, "Moisture dependent physical-mechanical properties from beech wood in the main directions," *Proligno*, vol. 11, no. 4, pp. 37–42, 2015.
- [167] P. Niemz, T. Ozyhar, S. Hering, and W. Sonderegger, "The orthotropic behaviour of the physical-mechanical properties of European beech wood," *Bautechnik*, vol. 92, no. 1, pp. 3–8, 2015.
- [168] J. Stamer and H. Sieglerschmidt, "Elastische formänderung der hölzer," *Vereines Deutscher Ingenieure*, vol. 77, pp. 503–505, 1933.
- [169] V. Bucci, P. Corigliano, V. Crupi, G. Epasto, E. Guglielmino, and A. Marinò, "Experimental investigation on Iroko wood used in shipbuilding," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 231, no. 1, pp. 128–139, 2017.
- [170] P. Dumond and N. Baddour, "Experimental investigation of the mechanical properties and natural frequencies of simply supported Sitka spruce plates," *Wood Science and Technology*, vol. 49, no. 6, pp. 1137–1155, 2015.
- [171] H. Yoshihara and M. Yoshinobu, "Young's modulus and shear modulus of solid wood measured by the flexural vibration test of specimens with large height/length ratios," *Holzforschung*, vol. 69, no. 4, pp. 493–499, 2015.
- [172] M. Roohnia and M. Kohantorabi, "Dynamic methods to evaluate the shear modulus of wood," *BioResources*, vol. 10, no. 3, pp. 4867–4876, 2015.
- [173] J. R. Aira, F. Arriaga, and G. Íñiguez-González, "Determination of the elastic constants of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood by means of compression tests," *Biosystems Engineering*, vol. 126, pp. 12–22, 2014.
- [174] L. Moya and V. Baño, "Elastic behavior of fast-growth Uruguayan pine determined from compression and bending tests," *BioResources*, vol. 12, no. 3, pp. 5896–5912, 2017.
- [175] K. A. Orlowski, T. Ochrymiuk, J. Sandak, and A. Sandak, "Estimation of fracture toughness and shear yield stress of orthotropic materials in cutting with rotating tools," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 178, pp. 433–444, 2017.
- [176] T. Ehrhart, R. Brander, G. Schickhofer, and A. Frangi, "Rolling shear properties of some European timber species with focus on cross laminated timber - test configuration and parameter study," *48th Meeting of the International Network on Timber Engineering Research*, Šibenik, Croatia, 2015, pp. 61–76.

- [177] L. Franzoni, A. Lebee, F. Lyon, and G. Foret, “Advanced modelling for design helping of heterogeneous CLT panels in bending,” *48th Meeting of the International Network on Timber Engineering Research*, Šibenik, Croatia, 2015, pp. 203–213.
- [178] R. Brandner *et al.*, “Shear properties of cross laminated timber (CLT) under in plane load: Test configuration and experimental study,” *48th Meeting of the International Network on Timber Engineering Research*, Šibenik, Croatia, 2015, pp. 181–200.
- [179] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, and A. Thiel, “Cross laminated timber (CLT): overview and development,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, no. 3, pp. 331–351, 2016.
- [180] H. Ido, H. Nagao, M. Harada, H. Kato, J. Ogiso, and A. Miyatake, “Effects of the width and lay-up of sugi cross-laminated timber (CLT) on its dynamic and static elastic moduli, and tensile strength,” *Jorunal of Wood Science*, vol. 62, no. 1, pp. 101–108, 2016.
- [181] Y. Liao *et al.*, “Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers,” *Construction and Building Materials*, vol. 132, pp. 508–515, 2017.
- [182] J. B. Mustamin and B. Suryoatmono, “Shear modulus evaluation of three-ply cross-laminated Kapur wood beams from shear moduli of individual laminae,” *Procedia Engineering*, vol. 171, pp. 1353–1361, 2017.
- [183] H. Park, M. Fushitani, H. Byeon, and J. Yang, “Static bending strenght performance of cross-laminated wood panels made with six species,” *Wood and Fiber Science*, vol. 48, no. 2, pp. 1–13, 2016.
- [184] S. Aicher, M. Hirsch, and Z. Christian, “Hybrid cross-laminated timber plates with beech wood cross-layers,” *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 1007–1018, 2016.
- [185] S. Aicher, Z. Christian, and M. Hirsch, “Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations,” *Holzforschung*, vol. 70, no. 8. pp. 773–781, 2016.
- [186] E. Baradit, D. Keunecke, T. Schnider, and P. Niemz, “Stiffness moduli of various extraneous species determined with ultrasound,” *Wood Research*, vol. 57, no. 1, pp. 173–178, 2012.
- [187] B. Xu, Y. Wang, Y. Zhao, and W. Dong, “Influence of growth ring orientation on the interlaminar fracture toughness in glued-laminated timber,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, no. 5, pp. 4016001–9, 2016.
- [188] V. Karagiannis, C. Málaga-Chuquitaype, and A. Y. Elghazouli, “Modified foundation modelling of dowel embedment in glulam connections,” *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 1168–1179, 2016.
- [189] H. Yoshihara, S. Suzuki, and M. Yoshinobu, “In-plane shear properties of medium-density fibreboard measured by asymmetric four-point bending of a notched specimen,” *Wood Science and Technology*, vol. 50, no. 3, pp. 475–487, 2016.
- [190] E. Baradit and P. Niemz, “Selected physical and mechanical properties of Chilean wood species Tapa, Olivillo, Laurel, Lenga, Alerce and Manio,” *17th Symposium Nondestructive Testing of Wood*, Sopron, Hungary, 2011, pp. 395–401.

- [191] S. Okoroafor, O. Ibearugbulam, E. Onukwugha, L. Anyaogu, and E. Adah, "Structural characteristics of sawdust-sand-cement composite," *International Journal of Advanced Research and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 173–180, 2017.
- [192] E. V. Bachtiar, S. J. Sanabria, J. P. Mittig, and P. Niemz, "Moisture-dependent elastic characteristics of walnut and cherry wood by means of mechanical and ultrasonic test incorporating three different ultrasound data evaluation techniques," *Wood Science and Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 47-67, 2017.
- [193] S. Harrison, "Comparison of shear modulus test methods," MSc Thesis, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, USA, 2006.
- [194] S. Harrison and D. Hindman, "Test method comparison of shear modulus evaluation of MSR and SCL products," *Forest Products*, vol. 57, pp. 32–38, 2007.
- [195] T. Dündar and F. Divos, "European wood NDT&NDE research and practical applications," *Eurasian Journal of Forest Science*, vol. 1, no. 1, pp. 35–43, 2014.
- [196] T. Dündar, X. Wang, N. As, and E. Avcı, "Potential of ultrasonic pulse velocity for evaluating the dimensional stability of oak and chestnut wood," *Ultrasonics*, vol. 66, pp. 86–90, 2016.
- [197] C. Clorius, "Fatigue in wood- An investigation in tension perpendicular to the grain," Danmarks Tekniske Universitet, Kongens Lyngby, Rep. BYG DTU R038, 2002.
- [198] J. A. Nairn, "A numerical study of the transverse modulus of wood as a function of grain orientation and properties," *Holzforschung*, vol. 61, no. 4, pp. 406–413, 2007.
- [199] J. Xavier, A. Majano, and J. Cabo, "On the identifiability of stiffness components of clear wood from a 3D off-axes prismatic specimen: angle orientation and friction effects," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, no. 3, pp. 285–290, 2016.
- [200] T. Yılmaz Aydın and M. Aydın, "Three dimensional finite element analysis of compression behavior of Oriental beech," *4th International Furniture and Decoration Congress*, Düzce, Turkey, 2017, pp. 190–197.
- [201] A. İbrahim and M. Mahmood, "Finite element modeling of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates," *European Journal of Scientific Research*, vol. 30, no. 4, pp. 526–541, 2009.
- [202] N. Tankut, A. Tankut, and M. Zor, "Finite element analysis of wood materials," *Drvna Industrija.*, vol. 65, no. 2, pp. 159–171, 2014.
- [203] M. Gaff, M. Gašparík, V. Borůvka, and M. Babiak, "Simulating stresses associated with the bending of wood using a finite element method," *BioResources*, vol. 10, no. 2, pp. 2009–2019, 2015.
- [204] S. Vratuša, M. Kariž, N. Ayırlımsı, and M. K. Kuzman, "Finite element simulations of the loading and deformation of plywood seat shells," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 75, no. 5, pp. 729–738, 2017.
- [205] T. Yılmaz, "Sandalye çerçevelerinin sonlu eleman analizi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2011.
- [206] N. Yıldırım, B. Uysal, A. Özçiftçi, H. Yorur, and S. Özcan, "Finite elements

- analysis (fatigue) of wooden furniture strength,” *27th International Conference Research for Furniture Industry*, Ankara, Turkey, 2015, pp. 336–342.
- [207] M. Aydın and T. Yılmaz Aydın, “Finite element analysis of chair frame using CATIA,” *4th International Furniture and Decoration Congress*, Düzce, Turkey, 2017, pp. 22–32.
- [208] A. Kasal, H. Efe, T. Kuşkun ve Y. Erdil, “Çeşitli ölçülerde zıvana kullanılmış T-tipi mobilya birleştirmelerinin mekanik davranış özelliklerinin sonlu elemanlar analizi ile belirlenmesi,” *Selçuk Teknik Online*, vol. UMDK, no. 1, pp. 785–801, 2015.
- [209] A. Karaman, “Stiffness analysis of knockdown bookcases with finite element method,” *Journal of Bartın Faculty of Forestry*, vol. 18, no. 2, pp. 9–19, 2016.
- [210] E. Güntekin, “Kavelalı mobilya köşe birleştirmelerinin sonlu elemanlar analizi,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. A, s. 1, ss. 159–169, 2004.
- [211] A. Marmier, S. Biesheuvel, M. Elmalik, A. Kirke, M. Langhof, J. P. Paiva, J. Toudup, and K. E. Evans, “Evidence of negative Poisson’s ratio in wood from finite element analysis and off-axis compression experiments,” *Materials Letters*, vol. 210, pp. 255–257, 2018.
- [212] Y.-F. Hwang and H. Suzuki, “A finite-element analysis on the free vibration of Japanese drum wood barrels under material property uncertainty,” *Acoustical Science and Technology*, vol. 37, no. 3, pp. 115–122, 2016.
- [213] J. Hunt and H. Gu, “Finite element analyses of two dimensional, anisotropic heat transfer in wood,” *International ANSYS Conference*, Pittsburgh, USA, 2004, p. 13.
- [214] M. Vaziri, S. Berg, D. Sandberg, and I. T. Gheinani, “Three-dimensional finite element modelling of heat transfer for linear friction welding of Scots pine,” *Wood Material Science and Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 102–109, 2014.
- [215] A. Sretenovic, U. Muller, W. Gindl, and A. Teischinger, “New shear assay for the simultaneous determination of shear strength and shear modulus in solid wood: Finite element modeling and experimental results,” *Wood and Fiber Science*, vol. 36, no. 3, pp. 302–310, 2004.
- [216] A. Cavalli, B. Marcon, D. Cibecchini, P. Mazzanti, M. Fioravanti, L. Procino, M. Togni, “Dynamic excitation and FE analysis to assess the shear modulus of structural timber,” *Materials and Structures*, vol. 50, no. 2, p. 130, 2017.
- [217] A. Karakoç and J. Freund, “Effect of size and measurement domain on the in-plane elasticity of wood-like cellular materials,” *Journal of Materials Science*, vol. 51, pp. 1490–1495, 2016.
- [218] L. Zhang and N. Yang, “Evaluation of a modified Iosipescu shear test method for determining the shear properties of clear wood,” *Wood Science and Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 323–343, 2017.
- [219] J. Pencik, “Modelling of experimental tests of wooden specimens from Scots Pine (*Pinus sylvestris*) with the help of anisotropic plasticity material model,” *Drvna Industrija*, vol. 66, no. 1, pp. 27–33, 2015.
- [220] H. Yoshihara, “Measurement of the shear modulus of wood by static bending

- tests,” *Journal of Wood Science*, vol. 44, no. 1, pp. 15–20, 1998.
- [221] A. Olsson and B. Källsner, “Shear modulus of structural timber evaluated by means of dynamic excitation and FE analysis,” *Materials and Structures*, vol. 48, no. 4, pp. 977–985, 2015.
- [222] G. Kouroussis, L. Ben Fekih, and T. Descamps, “Assessment of timber element mechanical properties using experimental modal analysis,” *Construction and Building Materials*, vol. 134, pp. 254–261, 2017.
- [223] D. Andrews, “Modelling of ultrasonic transducers and ultrasonic wave propagation for commercial applications using finite elements with experimental visualization of waves for validation,” *Excerpt from Proceedings 2014 COMSOL Conference Cambridge*, p. 1, 2014.
- [224] R. F. Hearmon, “The assessment of wood properties by vibrations and high frequency acoustic waves,” *Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Pullman, USA, 1965, pp. 49–66.
- [225] J. E. Zimmer and J. R. Cost, “Determination of the elastic constants of a unidirectional fiber composite using ultrasonic velocity measurements,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 47, no. 3B, pp. 795–803, 1970.
- [226] C. Preziosa, M. Mudry, J. Launay, and F. Gilletta, “Determination of the elastic constants of wood by an acoustic method using immersion,” *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, vol. Serie II, no. 293, pp. 91–94, 1981.
- [227] C. Preziosa, “Method for determining elastic constants of wood material by use of ultrasound,” Ph.D. dissertation, Université d’Orléans, Orléans, France, 1982.
- [228] F. Beall, H. Reis, A. Senalik, and M. McGovern, “Ultrasonic nondestructive evaluation of wood and wood products - past, present and future,” *Pro ligno*, vol. 9, no. 4, pp. 540–546, 2013.
- [229] U. Halabe, H. V. . GangaRao, and C. Solomon, “Nondestructive evaluation of wood using ultrasonic drycoupled transducers,” *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol. 12, pp. 2251–2256, 1993.
- [230] F. Campbell, *Inspection of Metals-Understanding The Basics*. Ohio, USA: ASM International, 2013.
- [231] C. Senalik, G. Schueneman, and R. Ross, “Ultrasonic-based nondestructive evaluation methods for wood a primer and historical review,” USDA Forest Products Laboratory, Madison, USA, General Technical Rep. 235, 2014.
- [232] S. Wang, C. Chiu, and C. Lin, “Variations in ultrasonic wave velocity and dynamic Young’s modulus with moisture content for Taiwanese plantation lumber,” *Wood and Fiber Science*, vol. 73, no. 3, pp. 370–381, 2002.
- [233] O. De Andrade Maia, F. Schneider, J. Maia, L. Neves, and S. R. Penteado, “Wood characterization using the power spectral density and phase velocity of ultrasonic signals,” *IEEE International Ultrasonics Symposium*, Chicago, USA, 2014, pp. 1416–1419.
- [234] P. Miettinen, M. Tiitta, and R. Lappalainen, “Electrical and ultrasonic analysis of heat-treated wood,” in *14th Symposium Nondestructive Testing of Wood*, 2005, pp. 267–273.
- [235] M. J. Morales Conde, C. Rodriguez Lintildan, and P. Rubio de Hita, “Use of

- ultrasound as a nondestructive evaluation technique for sustainable interventions on wooden structures,” *Building and Environment*, vol. 82, pp. 247–257, 2014.
- [236] X. Song, Y. Zhang, X. Gu, W. Zhang, R. Jiang, and L. Ravel, “Non-destructive testing of wood members from existing timber buildings by use of ultrasonic method,” *World Conference on Timber Engineering*, Auckland, Canada, 2012, pp. 245–250.
- [237] A. Vorobyev, O. Arnould, D. Laux, R. Longo, N. P. Van Dijk, and E. K. Gamstedt, “Characterisation of cubic oak specimens from the Vasa ship and recent wood by means of quasi-static loading and resonance ultrasound spectroscopy,” *Holzforschung*, vol. 70, no. 5, pp. 457–465, 2016.
- [238] V. Bucur and R. R. Archer, “Elastic constants for wood by an ultrasonic method,” *Wood Science and Technology*, vol. 18, no. 4, pp. 255–265, 1984.
- [239] A. N. Mat Daud, R. Jaafar, S. K. Ayop, M. I. H. Yaacob, and M. S. Rohani, “Elastic constant determination of hardwoods using ultrasonic insertion technique,” *Ultrasonics*, vol. 75, pp. 194–198, 2017.
- [240] C. Kohlhauser and C. Hellmich, “Determination of Poisson’s ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of combined ultrasonic-mechanical testing of normal stiffnesses: Application to metals and wood,” *European Journal of Mechanics A/Solids*, vol. 33, pp. 82–98, 2012.
- [241] R. Gonçalves, A. Trinca, and D. Cerri, “Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing,” *Wood and Fiber Science*, vol. 43, no. 2007, pp. 64–75, 2011.
- [242] R. Gonçalves, A. J. Trinca, and B. P. Pellis, “Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens,” *Wood Science and Technology*, vol. 48, no. 2, pp. 269–287, 2014.
- [243] T. Ozyhar, S. Hering, S. J. Sanabria, and P. Niemz, “Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves,” *Wood Science and Technology*, vol. 47, no. 2, pp. 329–341, 2013.
- [244] R. Longo, T. Delaunay, D. Laux, M. El Mouridi, O. Arnould, and E. Le Clézio, “Wood elastic characterization from a single sample by resonant ultrasound spectroscopy,” *Ultrasonics*, vol. 52, no. 8, pp. 971–974, 2012.
- [245] M. El Mouridi, T. Laurent, L. Brancheriau, O. Arnould, A. Famiri, A. Hakam, and J. Gril, “Searching for material symmetries in the burr wood of thuja by a direct contact ultrasonic method on spherical samples,” *Maderas Ciencia y Tecnología*, vol. 13, no. 3, pp. 285–296, 2011.
- [246] M. L. Francois, “Identification of the material symmetries of anisotropic materials,” Ph.D. dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris, Paris, France, 1995.
- [247] C. Vazquez, R. Gonçalves, M. Guaita, and C. Bertoldo, “Determination of mechanical properties of Castanea Sativa Mill. by ultrasonic wave propagation and comparison with the compression method,” *18th Symposium Nondestructive Testing of Wood*, Madison, USA, 2013, pp. 426–433.
- [248] E. Kahle and J. Woodhouse, “The influence of cell geometry on the elasticity of softwood,” *Journal of Materials Science*, vol. 29, no. 5, pp. 1250–1259, 1994.

- [249] K. Kranitz, M. Deublein, and P. Niemz, “Strength estimation of aged wood by means of ultrasonic devices,” *The Future of Quality Control for Wood and Wood Products - The Final Conference of COST Action E53*, Edinburgh, Scotland, 2010, p. 9.
- [250] K. Kranitz, “Effect of natural aging on wood,” Ph.D. dissertation, ETH Zürich, Zürich, Switzerland, 2014.
- [251] K. Kránitz, M. Deublein, and P. Niemz, “Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices,” *Materials and Structures*, vol. 47, no. 6, pp. 925–936, 2014.
- [252] N. T. Davies, C. M. Altaner, and L. A. Apiolaza, “Elastic constants of green *Pinus radiata* wood,” *New Zealand Journal of Forestry Science*, vol. 46, no. 1, p. 19, 2016.
- [253] S. Akar, “Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) odununun elastik sabitlerinin belirlenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye 2017.
- [254] G. Íñiguez, M. Esteban, F. Arriaga, I. Bobadilla, and M. . Gil, “Influence of specimen length on ultrasound wave velocity,” *15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Duluth, USA, 2007, pp. 155–159.
- [255] G. Íñiguez, R. Martinez, I. Babadilla, F. Arriaga, and M. Esteban, “Mechanical properties assessment of structural coniferous timber by means of parallel and perpendicular to the grain wave velocity,” *16th Symposium Nondestructive Testing of Wood*, Beijing, China, 2009, pp. 79–84.
- [256] E. Güntekin and T. Yılmaz Aydın, “Prediction of bending properties for some softwood species grown in Turkey using ultrasound,” *Wood Research*, vol. 61, no. 6, pp. 993–1002, 2016.
- [257] E. Hermoso, M. Montero, M. Esteban, R. Mateo, and D. Llana, “The classification of large cross section sawn timber in the structural use of *Pinus silvestris* L. using NDT together with visual grading,” *18th Symposium Nondestructive Testing of Wood*, Madison, USA, 2013, pp. 418–424.
- [258] F. Tallavó, G. Cascante, and M. D. Pandey, “Estimation of the probability distribution of wave velocity in wood poles,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 1272–1280, 2011.
- [259] F. Tallavo, M. D. Pandey, and G. Cascante, “Probabilistic characterization of ultrasonic wave propagation in wood poles,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 39, no. 4, pp. 484–493, 2012.
- [260] J. Baar, J. Tippner, and V. Gryc, “The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 70, no. 5, pp. 767–769, 2012.
- [261] Ü. Büyüksarı and N. As, “Non-destructive evaluation of beech and oak wood bent at different radii,” *Composites Part B Engineering*, vol. 48, pp. 106–110, 2013.
- [262] C. Puccini, R. Gonçalves, and M. E. Monterio, “Statistical evaluation of the ultrasonic wave velocity variation in defective wood,” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 6, no. 3, pp. 499–503, 2002.

- [263] L. Calegari, D. Gatto, and D. Stangerlin, "Influence of moisture content, specific gravity and specimen geometry on the ultrasonic pulse velocity in *Eucalyptus grandis* hill ex maiden wood," *Ciência da Madeira*, vol. 2, no. 2, pp. 64–74, 2011.
- [264] D. F. Llana, G. Iñiguez-Gonzalez, F. Arriaga, and X. Wang, "Time-of-Flight adjustment procedure for acoustic measurements in structural timber," *BioResources*, vol. 11, no. 2, pp. 3303–3317, 2016.
- [265] L. Karlinasari, H. Baihaqi, A. Maddu, and T. R. Mardikanto, "The acoustical properties of Indonesian hardwood species," *Makara Journal of Science*, vol. 2, no. 2, pp. 110–114, 2012.
- [266] A. Arciniegas, F. Prieto, L. Brancheriau, and P. Lasaygues, "Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees," *Trees-Structure and Function*, vol. 28, no. 6, pp. 1559–1567, 2014.
- [267] D. Auty, "Non-destructive evaluation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to determine timber quality following conversion to continuous cover forestry systems," MSc. Thesis, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland, 2006.
- [268] H. Lindström, M. Reale, and M. Grekin, "Using non-destructive testing to assess modulus of elasticity of *Pinus sylvestris* trees," *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 24, no. 3, pp. 247–257, 2009.
- [269] W. Dzbenski and T. Wiktorski, "Ultrasonic evaluation of mechanical properties of wood in standing trees," *COST E 53 Conference - Quality Control for Wood and Wood Products*, Warsaw, Poland, 2007, p.
- [270] L. Karlinasari, N. Indahsuary, H. T. Kusumo, E. Santoso, M. Turjaman, and D. Nandika, "Sonic and ultrasonic waves in agarwood trees (*Aquilaria microcarpa*) inoculated with *fusarium solani*," *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 27, no. 3, pp. 351–356, 2015.
- [271] L. Karlinasari, N. Putri, M. Turjaman, I. Wahyudi, and D. Nandika, "Moisture content effect on sound wave velocity and acoustic tomograms in agarwood trees (*Aquilaria malaccensis* Lamk.)," *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, vol. 40, no. 5, pp. 696–704, 2016.
- [272] S. Sanabria, J. Neuenschwander, P. Niemz, and U. Sennhauser, "Structural health monitoring of glued laminated timber with a novel air-coupled ultrasound method," *11th World Conference on Timber Engineering*, Trentino, Italy, 2010, p. 3629.
- [273] T. Leighton, "Chapter 1: The sound field," in *The Acoustic Bubble*, T. Leighton, Ed. New York, USA: Academic Press, 1994, pp. 1–66.
- [274] P. Niemz and D. Mannes, "Non-destructive testing of wood and wood-based materials," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 13, no. 3, pp. S26–S34, 2012.
- [275] H. Becker and D. Noack, "Studies on dynamic torsional viscoelasticity of wood," *Wood Science and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 213–230, 1968.
- [276] D. Ridley-Ellis, C. Popescu, B. Keating, M. Popescu, and C. A. Hill, "Stiffness changes during low temperature thermal treatment of Scots pine, assessed by acoustic NDT," *7th European Conference on Wood Modification*, Lisboa, Portugal, 2014, p. 184.
- [277] D. De Vallance, "Non-destructive evaluation of veneer using optical scanning

- and ultrasonic stress wave analysis systems,” Ph.D. dissertation, Oregon State University, Oregon, USA, 2009.
- [278] H. Yang, L. Yu, and L. Wang, “Effect of moisture content on the ultrasonic acoustic properties of wood,” *Journal of Forestry Research*, vol. 26, no. 3, pp. 753–757, 2015.
- [279] H. van Dyk and R. Rice, “Ultrasonic wave velocity as a moisture indicator in frozen and unfrozen lumber,” *Forest Products Journal*, vol. 55, no. 6, pp. 68–72, 2005.
- [280] D. Llana, G. Íñiguez-Gonzalez, F. Arriaga, and P. Niemz, “Influence of temperature and moisture content in non-destructive values of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.),” *18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, Madison, USA, 2013, pp. 451–458.
- [281] D. F. Llana, G. Íñiguez-Gonzalez, F. Arriaga, and P. Niemz, “Influence of temperature and moisture content on non-destructive measurements in Scots pine wood,” *Wood Research*, vol. 59, no. 5, pp. 769–780, 2014.
- [282] S. Gao, X. Wang, L. Wan, and R. Allison, “Modeling temperature and moisture state effects on acoustic velocity in wood,” *17th Symposium Nondestructive Testing of Wood*, Sopron, Hungary, 2011, pp. 411–418.
- [283] L. Zhu, Y. Liu, and Z. Liu, “Effect of high temperature heat treatment on the acoustic-vibration performance of *Picea jezoensis*,” *Bioresources*, vol. 11, no. 2, pp. 4921–4934, 2016.
- [284] S. L. Quarles, “The effect of moisture content and ring angle on the propagation of acoustic signals in wood,” *Journal of Acoustic Emission*, vol. 9, no. 3, pp. 189–195, 1990.
- [285] F. G. R. de Oliveira, M. Candian, F. F. Lucchette, J. Luis Salgon, and A. Sales, “A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (*Goupia glabra*),” *Building and Environment*, vol. 40, no. 2, pp. 297–300, 2005.
- [286] U. Halabe, H. GangaRao, and V. Hota, “Nondestructive evaluation of wood using ultrasonic frequency domain analysis,” *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol. 14, pp. 1653–1660, 1995.
- [287] H. Sakai, A. Minamisawa, and K. Takagi, “Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods,” *Ultrasonics*, vol. 28, no. 6, pp. 382–385, 1990.
- [288] F. G. R. Oliveira, M. Candian, F. F. Lucchette, J. L. Salgon, and A. Sales, “Moisture content effect on ultrasonic velocity in *Goupia Glabra*,” *Materials Research*, vol. 8, no. 1, pp. 11–14, 2005.
- [289] M. Montero, J. de la Mata, M. Esteban, and E. Hermoso, “Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section pieces for structural use of Scots pine from Spain,” *Maderas Ciencia y Tecnología*, vol. 17, no. 2, pp. 407–420, 2015.
- [290] R. J. Ross and R. F. Pellerin, “NDE of green material with stress waves: preliminary results using dimension lumber,” *Forest Products Journal*, vol. 41, no. 6, pp. 57–59, 1991.

- [291] W. T. Simpson and X. Wang, "Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying," *Forest Products Journal*, vol. 51, no. 10, pp. 51–54, 2001.
- [292] H. Kang and R. E. Booker, "Variation of stress wave velocity with MC and temperature," *Wood Science and Technology*, vol. 36, no. 1, pp. 41–54, 2002.
- [293] M. A. Saadat-Nia, L. Brancheriau, P. Gallet, A. A. Enayati, K. Pourtahmasi, and F. Honarvar, "Ultrasonic wave parameter changes during propagation through poplar and spruce reaction wood," *BioResources*, vol. 6, no. 2, pp. 1172–1185, 2011.
- [294] M. F. Kabir, H. A. A. Sidek, W. M. Daud, and K. Khalid, "Effect of moisture content and grain angle on the ultrasonic properties of rubber wood," *Holzforschung*, vol. 51, no. 3, pp. 263–267, 1997.
- [295] H. Si, Z. Lu, and L. Wang, "Influence of moisture content on the dynamic MOE of Larchwood," *Wood Processing Machinery*, vol. 1, pp. 16–19, 2007.
- [296] R. Gonçalves, R. G. Lorensani, T. Negreiros, and C. Bertoldo, "Moisture-related adjustment factor to obtain a reference ultrasonic velocity in structural lumber of plantation hardwood," *Wood Material Science and Engineering*, vol. 0, no. 0, pp. 1–8, 2017.
- [297] C. B. Secco, R. Gonçalves, D. G. P. Cerri, É. C. Vasques, and F. A. F. Batista, "Behavior of ultrasonic waves in wood with presence of holes," *CERNE*, vol. 18, no. 3, pp. 507–514, 2012.
- [298] N. Wang and L. Wang, "Response of ultrasonic wave velocity to wood structure defect of Korean Pine," *Advanced Materials and Processes*, vol. 311–313, pp. 1609–1613, 2011.
- [299] J. B. Molyneux and D. R. Schmitt, "Compressional-wave velocities in attenuating media: A laboratory physical model study," *Geophysics*, vol. 65, no. 4, p. 1162, 2000.
- [300] E. Oberhofnerová, K. Arnetová, T. Holeček, V. Borůvka, and J. Bomba, "Determination of correlation between destructive and nondestructive test methods applied on modified wood exposed to natural weathering," *BioResources*, vol. 11, no. 2, pp. 5155–5168, 2016.
- [301] W. Lin and J. Wu, "Non-destructive testing of wood defects for Korean pine in northeast China based on ultrasonic technology," *2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing*, KunMing, China, 2013.
- [302] F. G. R. de Oliveira and A. Sales, "Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods," *Bioresource Technology*, vol. 97, no. 18, pp. 2443–2446, 2006.
- [303] L. Tomppo, "Novel applications of electrical impedance and ultrasound methods for wood quality assessment," Ph.D. dissertation, Dept. of Physics and Mathematics, University of Eastern Finland, Kuopio, Finland, 2013.
- [304] K. Metwally, E. Lefevre, C. Baron, R. Zheng, M. Pithioux, and P. Lasaygues, "Measuring mass density and ultrasonic wave velocity: A wavelet-based method applied in ultrasonic reflection mode," *Ultrasonics*, vol. 65, pp. 10–17, 2016.

- [305] S. S. Chauhan and J. C. F. Walker, "Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationships in radiata pine," *Forest Ecology and Management*, vol. 229, no. 1–3, pp. 388–394, 2006.
- [306] U. Dackermann, K. Crews, B. Kasal, J. Li, M. Riggio, F. Rinn, and T. Tannert, "In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements," *Materials and Structure*, vol. 47, no. 5, pp. 787–803, 2014.
- [307] J. Zhou, J. Liu, W. Gao, Z. Cui, W. Lv, and K. Wang, "Effect of anisotropy on shear wave velocity in wood," *Advanced Materials Research*, vol. 535–537, pp. 1923–1926, 2012.
- [308] Y. Sasaki and M. Hasegawa, "Effects of cyclic loading on velocities of ultrasonic waves propagating through wood," *Wood and Fiber Science*, vol. 35, no. 1, pp. 110–119, 2003.
- [309] K. Borgin, N. Parameswaran, and W. Liese, "The effect of aging on the ultrastructure of wood," *Wood Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 87–98, 1975.
- [310] T. Nilsson and G. Daniel, "Structure and the aging process of dry archaeological wood," in *Archaeological Wood: Properties, Chemistry, and Preservation*, R. Rowell and R. Barbour, Eds. Washington, USA: American Chemical Society, 1990, pp. 67–86.
- [311] D. Erhardt, M. Mecklenburg, and C. Tumosa, "New versus old wood: Differences and similarities in physical, mechanical, and chemical properties," *ICOM Committee for Conservation 11th Triennial Meeting*, Edinburgh, Scotland, 1996, vol. II, pp. 903–910.
- [312] M. Hasegawa and Y. Sasaki, "Acoustoelastic birefringence effect in wood II: influence of texture anisotropy on the polarization direction of shear wave in wood," *Journal of Wood Science*, vol. 50, no. 2, pp. 101–107, 2004.
- [313] M. Sadd, *Elasticity*. Burlington, USA: Elsevier, 2009.
- [314] H.-L. Yeh, "A dimensionless analysis of shear modulus and stress distribution for anisotropic materials," *Journal of Marine Engineering and Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 31–37, 2016.
- [315] R. Gonçalves, C. B. Pedroso, and M. V. Massak, "Acoustic and bending properties in *Pinus elliottii* beams obtained from trees of different ages," *Journal of Wood Science*, vol. 59, no. 2, pp. 127–132, 2013.
- [316] S. I. Schubert, D. Gsell, J. Dual, M. Motavalli, and P. Niemz, "Rolling shear modulus and damping factor of spruce and decayed spruce estimated by modal analysis," *Holzforschung*, vol. 60, no. 1, pp. 78–84, 2006.
- [317] C. J. McCarthy, C. Birkinshaw, J. T. Pembroke, and M. Hale, "Dynamic mechanical analysis as a technique for the study of fungal degradation of wood," *Biotechnology Techniques*, vol. 5, no. 6, pp. 493–496, 1991.
- [318] M. Titta, "Non-destructive methods for characterisation of wood material," Ph.D. dissertation, Natural and Environmental Sciences, University of Kuopio, Kuopio, Finland, 2006.
- [319] F. Divós and T. Tanaka, "Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood," *Acta Silvatica Lignaria Hungarica*, vol. 1, pp. 105–110,

2005.

- [320] D. Keunecke, W. Sonderegger, K. Pereteanu, T. Lüthi, and P. Niemz, "Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves," *Wood Science and Technology*, vol. 41, no. 4, pp. 309–327, 2007.
- [321] C. Scheer, *Holzbau - Taschenbuch, Bd. 1: Grundlagen, Entwurf und Konstruktion*, Band 1.8. Berlin, Germany: Ernst and Sohn, 1986.
- [322] S. Kazemi-Najafi, A. Shalbafan, and G. Ebrahimi, "Internal decay assessment in standing beech trees using ultrasonic velocity measurement," *European Journal of Forest Research*, vol. 128, no. 4, pp. 345–350, 2009.
- [323] H. L. Feng and G. H. Li, "Stress wave propagation modeling in wood non-destructive testing," *7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing*, Beijing, China, 2008, vol. 1-3, pp. 1441–1445\1569.
- [324] U. B. Halabe, G. M. Bidigalu, H. V. S. GangaRao, and R. J. Ross, "Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques," *Materials Evaluation*, vol. 55, no. 9, pp. 1013–1018, 1997.
- [325] X. Wang, R. J. Ross, M. McClellan, J. R. Barbour, J. R. Erickson, J. W. Forsman, and G.D. McGinnis, "Strength and stiffness assessment of standing trees using a nondestructive stress wave technique," USDA Forst Products Laboratory, Madison, USA, Rep. FPL-RP-585, 2000.
- [326] G. Li, X. Weng, X. Du, X. Wang, and H. Feng, "Stress wave velocity patterns in the longitudinal-radial plane of trees for defect diagnosis," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 124, pp. 23–28, 2016.
- [327] A. Bergander and L. Salmén, "Variations in transverse fibre wall properties: Relations between elastic properties and structure," *Holzforschung*, vol. 54, no. 6, pp. 654–660, 2000.
- [328] J. L. Sandoz, Y. Benoit, and L. Demay, "Wood testing using acousto-ultrasonic," *12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Sopron, Hungary, 2000, pp. 1–6.
- [329] R. Falk, M. Patton-Mallory, and K. McDonald, "Nondestructive testing of wood products and structures: state of the art and research needs," in *Nondestructive Testing and Evaluation for Manufacturing and Construction*, New York, USA: Hemisphere Publishing, 1990, pp. 137–147.
- [330] F. G. Oliveira, J. A. de Campos, E. Pletz, and A. Sales, "Nondestructive evaluation of wood using ultrasonic techniques," *Maderas Ciencia y Tecnologia*, vol. 4, pp. 133-139, 2002.
- [331] S. Smulski, "Relationship of stress wave and static bending determined properties of four northeastern hardwoods," *Wood and Fiber Science*, vol. 23, no. 1, pp. 44–57, 1991.
- [332] A. Burmester, "Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz," *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 23, no. 6, pp. 227–236, 1965.
- [333] S. Ilıcan, "Ultras ses ile betonun bazı fiziksel özelliklerinin belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir,

Türkiye, 1995.

- [334] P. Grossi, T. Sartori, I. Giongo, and R. Tomasi, “Analysis of timber log-house construction system via experimental testing and analytical modelling,” *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 1127–1144, 2016.
- [335] D. Casagrande, S. Rossi, R. Tomasi, and G. Mischi, “A predictive analytical model for the elasto-plastic behaviour of a light timber-frame shear-wall,” *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 1113–1126, 2016.
- [336] O. Bulut, “Elastisite teorisi denklemlerinin mikromekaniğe uygulanması,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [337] H. İşler, “Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin esneklik katsayılarının ultrasonik ölçümü,” Yüksek Lisans Tezi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2015.
- [338] J. Szalai, *Anisotropic Strength and Elasticity of Wood and Wood Based Composites*, Private Ed. Sopron, Hungary: Publishing, 1994.
- [339] S. Cowin, “On the strength anisotropy of bone and wood,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 46, no. 4, pp. 832–838, 1979.
- [340] H. Pretzsch and A. Rais, “Wood quality in complex forests versus even-aged monocultures: review and perspectives,” *Wood Science and Technology*, vol. 50, no. 4, pp. 845–880, 2016.
- [341] M. Grekin and T. Surini, “Shear strength and perpendicular-to-grain tensile strength of defect-free Scots pine wood from mature stands in Finland and Sweden,” *Wood Science and Technology*, vol. 42, no. 1, pp. 75–91, 2008.
- [342] M. Kılıç, “Effect on shear strength of machining methods in *Pinus nigra* Arnold bonded with polyurethane and polyvinyl acetate adhesives,” *BioResources*, vol. 11, no. 3, pp. 6663–6676, 2016.
- [343] S. Aicher and D. Ohnesorge, “Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 69, no. 1, pp. 143–154, 2011.
- [344] A. Krajewski, P. Kozakiewicz, and P. Witomski, “Shear strength of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from the historical buildings,” *Wood Research*, vol. 61, no. 5, pp. 845–850, 2016.
- [345] X. A. Wang, O. Hagman, B. Sundqvist, S. Ormarsson, H. Wan, and P. Niemz, “Shear strength of Scots pine wood and glued joints in a cold climate,” *BioResources*, vol. 11, no. 1, pp. 944–956, 2016.
- [346] M. Knorz, M. Schmidt, S. Torno, and J. W. Van De Kuilen, “Structural bonding of ash (*Fraxinus excelsior* L.): Resistance to delamination and performance in shearing tests,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 72, no. 3, pp. 297–309, 2014.
- [347] A. Temiz, S. Akbas, I. Aydin, and C. Demirkir, “The effect of plasma treatment on mechanical properties, surface roughness and durability of plywood treated with copper-based wood preservatives,” *Wood Science and Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 179–191, 2016.
- [348] E. Burdurlu, Y. Kılıç, G. C. Elibol, and M. Kılıç, “Shear strength of Calabrian

- pine (*Pinus brutia* Ten.) bonded with polyurethane and polyvinyl acetate adhesives,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 100, no. 6, pp. 4856–4867, 2006.
- [349] P. Niemz, S. Amman, T. Rohner, and F. Pichelin, “Mechanical performance of structural hardwood elements,” *7th Forum International Bois Construction*, Paris, France, 2017, pp. 1–10.
- [350] P. Král, P. Klímek, and D. Děcký, “Comparison of the bond strength of oak (*Quercus* L.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) wood glued with different adhesives considering various hydrothermal exposures,” *Journal of Forest Science*, vol. 61, no. 5, pp. 189–192, 2015.
- [351] J. Konnerth, M. Kluge, G. Schweizer, M. Miljković, and W. Gindl-Altmutter, “Survey of selected adhesive bonding properties of nine European softwood and hardwood species,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, no. 6, pp. 809–819, 2016.
- [352] K. Vasiliki and B. Ioannis, “Bondability of Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and beech wood (*Fagus sylvatica*) with polyvinyl acetate and polyurethane adhesives,” *Maderas Ciencia y Tecnologia.*, vol. 19, no. 1, pp. 87–94, 2017.
- [353] R. R. de Melo and C. H. S. del Menezzi, “Ultrasound nondestructive method to predict physical-mechanical properties of LVL made from *Schizolobium amazonicum*,” *Ciencia Florestal*, vol. 26, no. 1, pp. 263–272, 2016.
- [354] G. Murphy, *Properties of Engineering Materials*, 3rd Ed. Scraton, USA: International Textbook Company, 1957.
- [355] A. Uluata, “Ağaç malzemenin mekanik özelliklerine etki eden faktörler,” *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, c. 18, s. 1–4, ss. 113–124, 1987.
- [356] A. C. Eckelman, “The strenght design of furniture,” *Forest Products Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 21–24, 1966.
- [357] H. Efe, K. A. K. Çağatay ve T. Kuşkun, “Ahşap boy birleştirmelerde farklı bağlantı tekniklerinin çekme mukavemetlerinin karşılaştırılması,” *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 12, s. 1, ss. 80–89, 2012.
- [358] Ö. Can ve H. Tokgöz, “Ahşap çatı makaslarının düğüm noktalarında ön ahşap uzunluğunun deneysel yöntemle tayini,” *e-Journal New World Science Academy*, vol. 3, no. 4, pp. 571–579, 2008.
- [359] D. Riyanto and R. Gupta, “A comparison of test methods for evaluating shear strength of structural lumber,” *Forest Products Journal*, vol. 48, no. 2, pp. 83–90, 1998.
- [360] K. Çağatay, H. Efe, E. Burdurlu ve İ. Kesik, “Bazı ağaç malzemelerin vida tutma mukavemetlerinin belirlenmesi,” *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 12, s. 2, ss. 321–328, 2012.
- [361] B. C. Bal ve H. Özyurt, “Cam elyaf dokuma ile güçlendirilmiş tabakalı kaplama kerestenin bazı teknolojik özellikleri,” *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 18, s. 1, ss. 9–16, 2015.
- [362] *Kontrplak kaplanmış-Yapışma kalitesi bölüm 1: Deney metotları*, Türk Standardları Enstitüsü TS3969 EN314-1, 1998.
- [363] *Kontrplak-Yapışma kalitesi bölüm 2: Özellikler*, Türk Standardları Enstitüsü TS

EN 314-2, 1999.

- [364] N. As, T. Dündar ve Ü. Büyüksarı, “Türkiye’de yetişen ağaç türlerinin bazı fiziko-mekanik özellikleri bakımından sınıflandırılması,” *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, vol. 66, no. 2, pp. 727–735, 2016.
- [365] H. Efe ve K. Çağatay, “Çeşitli masif ağaç malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi,” *Politeknik Dergisi*, c. 14, s. 1, ss. 55–61, 2011.
- [366] *Odunda liflere paralel doğrultuda makaslama dayanımının tayini*, Türk Standardları Enstitüsü TS3459, 2010.
- [367] H. Efe ve A. Kasal, “Çeşitli masif ve kompozit ağaç malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi,” *Politeknik Dergisi*, c. 10, s. 3, ss. 303–311, 2007.
- [368] *Yonga levhaları-Yüzeğe paralel yöndeki makaslama mukavemetinin tayini*, Türk Standardları Enstitüsü TS5192, 2005.
- [369] D. Toksoy, G. Çolakoğlu, I. Aydın, S. Çolak, and C. Demirkir, “Technological and economic comparison of the usage of beech and alder wood in plywood and laminated veneer lumber manufacturing,” *Building and Environment*, vol. 41, no. 7, pp. 872–876, 2006.
- [370] H. Tan, “Farklı bölgelerde yetişen ladin ve göknar tomruklardan üretilmiş LVL ve kontrplakların bazı teknolojik özellikleri,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2011.
- [371] C. Güler ve G. Çolakoğlu, “Farklı koşullarda üretilen kızılçam (*Pinus brutia* ten.) kontrplaklarda çekme-makaslama direnci üzerine kaplama levhaların yüzey pürüzlülüğünün etkisi,” *Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 4, s. 1, ss. 92–98, 2001.
- [372] *Testing of wood adhesives and glued wood joints; shear and delamination tests for determining the failing strength of plywood bonds (plywood and coreboard)*, Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 53255, 1964.
- [373] *Kontrplak-Yapışma dayanımının tayini*, Türk Standardları Enstitüsü TS 47, 1981.
- [374] E. Çakıroğlu ve İ. Aydın, “Huş odununun kayın odununa alternatif olarak kontrplak üretiminde değerlendirilmesi,” *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, s. Özel Sayı, ss. 50–55, 2012.
- [375] Y. Liu and A. W. C. Lee, “Selected properties of parallel strand lumber made from southern pine and yellow-poplar,” *Holzforschung*, vol. 57, no. 2, pp. 207–212, 2003.
- [376] C. Güler ve G. Çolakoğlu, “Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) kontrplakların çekme-makaslama ve eğilme direncine, levha kalınlığı, tutkal türü ve ön presleme işleminin etkisi,” *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 46, s. 2, ss. 183–191, 1996.
- [377] İ. Keskin, *Malzeme El Kitabı*. Ankara, Türkiye: Onarsan, 1991.
- [378] H. Keskin, “Lamine masif ağaç malzemelerin teknolojik özellikleri ve ağaç işleri endüstrisinde kullanım imkânları,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2001.
- [379] *Standard specification for adhesives used in laminate joints for nonstructural glued lumber products*, American Society for Testing and Materials ASTM

D3110, 1995.

- [380] H. Keskin, M. Atar ve R. Kurt, “Lamine edilmiş sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri,” *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 6, s. 1, ss. 75–84, 2003.
- [381] K. Özkaya, “Determination of some physical and mechanical properties of Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) trees grown in the Denizli area of Turkey,” *International Journal of Physical Sciences*, vol. 8, no. 46, pp. 2063–2068, 2013.
- [382] N. Wallis, *Australian Timber Handbook*. Sydney, Australia: Angus and Robertson, 1970.
- [383] K. Won, N. Hong, S. Jung, K. Lee, B. Yoo, and H. Byeon, “Estimation of damage to black pine wood (*Pinus Thunbergii* Parl.) caused by *Matsucoccus Thunbergianae* Miller and Park,” *Bangladesh Journal of Botany*, vol. 44, no. 5, pp. 679–687, 2015.
- [384] H. Kayacık, *Orman ve Park Ağaçlarının Özel Sistematiği Gymnospermae (Açık Tohumlular) I. Cilt*, 2. Baskı. İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi, 1965.
- [385] F. Yalıtık, *Dendroloji Ders Kitabı I Gymnospermae (Açık Tohumlular)*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi, 1993.
- [386] E. İltar, A. Saraçbaşı ve Ö. Balkız, *Bazı Kızılçam Orjinlerinin Teknolojik Özelliklerinin Belirlenmesi*. Ankara, Türkiye: İç Anadolu Ormancılık Araştırma Enstitüsü, 2011.
- [387] M. Boydak, H. Dirik ve M. Çalıkoğlu, *Kızılçam (Pinus Brutia Ten.) Biyolojisi ve Silvikültürü*, 1. Baskı. Ankara, Türkiye: Lazer Ofset, 2006.
- [388] H. Gökmen, *Açıktohumlular (Gymnospermae)*. Ankara, Türkiye: Alkan Matbaası, 1970.
- [389] Orman Genel Müdürlüğü, *Oman Atlası*. Ankara, Türkiye: Ceta Tanıtım, 2013.
- [390] Y. Bozkurt, Y. Göker, N. Erdin ve N. As, “Datça Kızılçamı'nda anatomik ve teknolojik özellikler,” *Uluslararası Kızılçam Sempozyumu*, Muğla, Türkiye, 1993, ss. 828.
- [391] İ. Acar, “Kızılçam reçinesinin kimyasal yapısı,” *Ormancılık Araştırma Enstitüsü Yayınları Dergi Serisi*, c. 34, s. 1, ss. 138, 1988.
- [392] N. As, K. H. Koç, A. D. Doğu, C. Atik, B. Aksu ve E. S. Erdinler, “Türkiye’de yetişen endüstriyel öneme sahip ağaçların anatomik, fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri,” *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, c. 51, s. 1, ss. 71–88, 2001.
- [393] A. Erten, *Kızılçam (Pinus Brutia Ten.) ve Toros Sedirinin (Cedrus Libani A. Richard) Çeşitli Yöntemlerle Emprenyesi*, Ankara, Türkiye: Ormancılık Araştırma Enstitüsü, 1986.
- [394] M. Usta, “Kızılçam (*Pinus brutia*) kabuk ve odununun karşılaştırmalı kimyasal analizi,” *Uluslararası Kızılçam Sempozyumu*, Muğla, Türkiye, 1993, ss. 828.
- [395] E. Demetçi, “Kızılçam (*Pinus brutia*) kabuk taneni ile yapıştırılmış kayın kontrplakları üzerinde makro ve mikro teknolojik çalışmalar,” *Ormancılık Araştırma Enstitüsü Yayınları Dergi Serisi*, c. 33, s. 2, ss. 144, 1987.

- [396] M. Topçuoğlu ve M. Eren, *Yuvarlak Odunlarda Kuruma Paylarının Saptanması*. Ankara, Türkiye: Ormancılık Araştırma Enstitüsü, 1988.
- [397] E. Göksel ve Ö. Özden, “Kağıt endüstrisinde kızılçam (*Pinus brutia* Ten.),” *Uluslararası Kızılçam Sempozyumu*, Muğla, Türkiye, 1993, ss. 17.
- [398] N. Ay, “Alanya yöresi kızılçamlarının iç morfolojik özelliklerinin incelenmesi,” *Uluslararası Kızılçam Sempozyumu*, Muğla, Türkiye, 1993, ss. 828.
- [399] Ü. Yıldız, “Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) odunundan elde edilen odun-polimer kompozitlerinin bazı teknolojik özellikleri,” *Uluslararası Kızılçam Sempozyumu*, Muğla, Türkiye, 1993, ss. 28.
- [400] A. Berkel, “Kızılçam (*Pinus brutia*)’da teknolojik araştırmalar,” *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 7–A, s. 1, ss. 68, 1957.
- [401] E. Göksel, “Kızılçamın lif morfolojisi ve odunundan sülfat selülozu elde etme olanakları üzerine araştırmalar,” *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 31, s. 1, ss. 203–216, 1981.
- [402] E. Güntekin, Y. Cengiz, T. Aydoğan, T. Aydın, ve İ. Özdamar, “Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) kerestesinde elastikiyet modülünün doğrusal modelleme ve yapay sinir ağları ile tahmini,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 15, s. 2, ss. 64–68, 2014.
- [403] P. Erten ve S. Önal, “Kızılçam odununun özellikleri, korunması, reçine üretimi ve kullanım yerleri,” in *Kızılçam*, E. Öktem, Ed. Ankara, Türkiye: Orman Araştırma Enstitüsü, 1987, ss. 171–181.
- [404] H. Toker, “Borlu bileşiklerin ağaç malzemenin bazı fiziksel mekanik ve biyolojik özelliklerinin belirlenmesi,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [405] E. Öktem ve R. Sözen, *Reçine Üretiminin Kızılçam (*Pinus Brutia* Ten.) Odununun Fiziksel ve Mekaniksel Özellikleri Üzerine Etkisi*. Ankara, Türkiye: İç Anadolu Ormancılık Araştırma Enstitüsü, 1996.
- [406] D. Doğu, K. Koç, N. As, C. Atik, B. Aksu ve S. Erdinler, “Türkiye’de yetişen endüstriyel öneme sahip ağaçların temel kimlik bilgileri ve kullanıma yönelik genel değerlendirme,” *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 51, s. 2, ss. 71–88, 2001.
- [407] Y. Göker, “Dursunbey ve Elekdağ Karaçamları (*Pinus nigra* var. *Pallasiana*) nın fiziksel, mekanik özellikleri ve kullanım yerleri hakkında araştırmalar,” *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 19, s. 2, ss. 91–135, 1969.
- [408] S. Tosun, “Sarıçamın botanik özellikleri,” in *Sarıçam*, N. Giray, Ed. Ankara, Türkiye: Ormancılık Araştırma Enstitüsü, 1994, ss. 19–32.
- [409] G. Eliçin, “Türkiye Sarıçam (*Pinus silvestris* L.) larında morforenetik araştırmalar,” *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 17, s. 1, ss. 1971.
- [410] M. Tetik, “Sarıçamın doğal yayılışı,” in *Sarıçam*, N. Giray, Ed. Ankara, Türkiye: Ormancılık Araştırma Enstitüsü, 1994, ss. 33–40.
- [411] C. Aksoy, “Sarıçamın ekolojisi,” in *Sarıçam*, N. Giray, Ed. Ankara, Türkiye: Ormancılık Araştırma Enstitüsü, 1994, ss. 41–56.
- [412] R. Toker, *Batı Karadeniz Sarıçamının Teknik Vasıfları ve Kullanım Yerleri*

Hakkında Araştırmalar. Ankara, Türkiye: Güzel İstanbul Matbaası, 1960.

- [413] E. Öktem, “Sarıçam odununun özellikleri ve kullanım yerleri,” in *Sarıçam*, N. Giray, Ed. Ankara, Türkiye: Ormançılık Araştırma Enstitüsü, 1994, ss. 251-272.
- [414] S. Korkut, M. Akgül, and T. Dünder, “The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood,” *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 6, pp. 1861–1868, 2008.
- [415] A. Kurtoğlu ve S. Sofuoğlu, “Mobilya ve ağaç işlerinde kullanılan ahşap malzemeler 1,” *Mobilya ve Dekorasyon*, c. 118, ss. 62–78, 2013.
- [416] L. Schmerr and S. Song, *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems Models and Measurements*. New York, USA: Springer-Verlag, 2007.
- [417] Olympus. (2016, Jun 25). *Ultrasonic transducer technical notes* [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/ultrasonic-transducer-technical-notes/>
- [418] A. J. Trinca and R. Goncalves, “Effect of the transversal section dimensions and transducer frequency on ultrasound wave propagation velocity in wood,” *Revista Árvore*, vol. 33, no. 1, pp. 177–184, 2009.
- [419] F. G. Oliveira, K. Miller, M. Candian, and A. Sales, “Effect of the size of the specimen on ultrasonic velocity,” *Revista Árvore*, vol. 30, no. 1, pp. 141–145, 2006.
- [420] Olympus. (2016, Jun 25). *Transducers* [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/characteristic/>.
- [421] Anonym. (2016, Oct 12). *Radiated fields of ultrasonic transducers* [Online]. Available: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/radiatedfields.htm>.
- [422] E. Güntekin, T. Yılmaz Aydın, and M. Aydın, “Elastic constants of Calabrian pine and cedar,” *International Forestry Symposium*, Kastamonu, Turkey, 2016, pp. 645–649.
- [423] E. Güntekin and T. Yılmaz Aydın, “Determination of elastic constants for Anatolian Black pine wood using ultrasound,” *World Conference on Timber Engineering*, Vienna, Austria, 2016, pp. 976–981.
- [424] P. P. Gillis, “Orthotropic elastic constants of wood,” *Wood Science and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 138–156, 1972.
- [425] S. Koponen, T. Toratti, and P. Kanerva, “Modelling elastic and shrinkage properties of wood based on cell structure,” *Wood Science and Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 25–32, 1991.
- [426] M. Brabec, R. Lagaña, J. Milch, J. Tippner, and V. Sebera, “Utilization of digital image correlation in determining of both longitudinal shear moduli of wood at single torsion test,” *Wood Science and Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 29–45, 2017.
- [427] R. F. S. Hearmon and W. W. Barkas, “The effect of grain direction on the Young’s moduli and rigidity moduli of beech and sitka spruce,” *Proceedings of the Physical Society*, vol. 53, no. 6, pp. 674–680, 1941.

- [428] J. Bodig and Goodman, "Prediction of elastic parameters of wood," *Wood Science*, vol. 5, pp. 249–264, 1975.
- [429] A. Neumann, "Identification and evaluation of the elastic properties of solid wood depending on the moisture and anisotropy," MSc. Thesis, Dresden Technical University, Dresden, Germany, 1988.
- [430] E. R. da S. Leite, P. R. G. Hein, T. M. de Souza, and G. F. Rabelo, "Estimation of the dynamic elastic properties of wood from *Copaifera langsdorffii* Desf using resonance analysis," *Cerne*, vol. 18, no. 1, pp. 41–47, 2012.
- [431] V. Bucur and R. C. Chivers, "Acoustic properties and anisotropy of some australian wood species," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 75, no. 1, pp. 69–74, 1991.
- [432] R. Brandner, E. Gehri, T. Bogensperger, and G. Schickhofer, "Determination of modulus of shear and elasticity of glued laminated timber and related examinations," *International Council for Research and Innovation in Building and Construction Working Commission W18*, Bled, Slovenia, 2007, pp. 40-12–2.
- [433] A. Mishiro, "Effect of density on ultrasonic velocity in wood," *Mokuzai Gakkaishi*, vol. 42, no. 9, pp. 887–894, 1996.
- [434] J. Ilic, "Dynamic MOE of 55 species using small wood beams," *Holz als Roh und Werkstoff*, vol. 61, no. 3, pp. 167–172, 2003.
- [435] F. Teles, C. Del Menezzi, F. de Souza, and M. Souza, "Nondestructive evaluation of a tropical hardwood: Interrelationship between methods and physical-acoustical variables," *Ciência da Madeira*, vol. 2, no. 1, pp. 1–14, 2011.
- [436] S. Schubert, D. Gsell, J. Dual, M. Motavalli, and P. Niemz, "Resonant ultrasound spectroscopy applied to wood: comparison of the shear modulus grt of sound and decayed wood," *14th Nondestructive Testing of Wood Symposium*, Eberswalde, Germany, 2005, pp. 245–250.
- [437] V. Bucur and I. Böhnke, "Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood," *Ultrasonics*, vol. 32, no. 5, pp. 385–390, 1994.
- [438] X. Wang, "Stress wave E-rating of structural timber - Size and moisture content effects," *18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, Madison, USA, 2013, pp. 38–46.
- [439] E. G. Mason, M. Hayes, and N. Pink, "Validation of ultrasonic velocity estimates of wood properties in discs of radiata pine," *New Zealand Journal of Forestry Science*, vol. 47, no. 1, 2017.
- [440] R. J. Astley, J. J. Harrington, and K. A. Stol, "Mechanical modelling of wood microstructure, an engineering approach," *IPENZ Transactions*, vol. 24, no. 1, pp. 21–29, 1997.
- [441] Y. Göker, N. As, T. Akbulut ve T. DüNDAR, "Lif kırıklığının kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) odununun bazı mekanik özellikleri üzerine etkisi," *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, vol. 24, pp. 45–50, 2000.
- [442] J. L. Sandoz, "Nondestructive evaluation of building timber by ultrasound," *8th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Pullman, USA, 1991.
- [443] A. Mishiro, "Ultrasonic velocity and moisture content in wood .2. Ultrasonic

- velocity and average moisture content in wood during desorption (1); Moisture content below the fiber saturation point,” *Mokuzai Gakkaishi*, vol. 42, no. 6, pp. 612–617, 1996.
- [444] A. Mishiro, “Ultrasonic velocity and moisture content in wood .3. Ultrasonic velocity and average moisture content in wood during desorption .2. During desorption from a water-saturated condition” *Mokuzai Gakkaishi*, vol. 42, no. 10, pp. 930–936, 1996.
- [445] X. Wang, R. J. Ross, M. McClellan, J. R. Barbour, J. R. Erickson, J. W. Forsman, and G.D. McGinnis, “Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method,” *Wood and Fiber Science*, vol. 33, no. 4, pp. 522–533, 2001.
- [446] R. Goncalves and O. A. L. da Costa, “Influence of moisture content on longitudinal, radial, and tangential ultrasonic velocity for two Brazilian wood species,” *Wood and Fiber Science*, vol. 40, no. 4, pp. 580–586, 2008.
- [447] H. Unterwieser and G. Schickhofer, “Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency and ultrasonic runtime measurement,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 69, no. 2, pp. 171–181, 2011.
- [448] E. Güntekin, T. Aydin, and P. Niemz, “Prediction of compression properties in three orthotropic directions for some important Turkish wood species using ultrasound,” *Bioresources*, vol. 10, no. 4, pp. 7252–7262, 2015.
- [449] R. Rowell and R. Youngs, “Dimensional stabilization of wood in use,” USDA Forest Service Forest Products Laboratory, Madison, USA, Rep. 0243, 981.
- [450] C. Skaar, *Wood-Water Relations*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.
- [451] T. Alméras, A. Gronvold, A. van der Lee, B. Clair, and C. Montero, “Contribution of cellulose to the moisture-dependent elastic behaviour of wood,” *Composite Science and Technology*, vol. 138, pp. 151–160, 2017.
- [452] C. Mattheck and H. Kubler, *Wood-The Internal Optimization Of Trees*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.
- [453] A. Birks and R. Green, *Nondestructive Testing Handbook, Volume 7, Ultrasonic Testing (UT)*, 2nd. Ed. Columbus, USA: American Society for Nondestructive Testing, 1991.
- [454] Class Instrumentation Limited. (2016, Jun 4). *Ultrasonic sound velocity chart* [Online]. Available: [http://www.classltd.com/res/sound velocity chart.pdf](http://www.classltd.com/res/sound%20velocity%20chart.pdf).
- [455] Anonym. (2016, Jan 25). *Ultrasound* [Online]. Available: <http://www.bio-sound.com/UltrPhys/UltrPhysMain.htm>.
- [456] Ş. Ekinçi, A. Yıldırım ve S. Sarıçam, *Ultrasonik Test Seviye : 1*. İstanbul, Türkiye: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, 2001.
- [457] V. Bucur and P. N. J. Rasolofosaon, “Dynamic elastic anisotropy and nonlinearity in wood and rock,” *Ultrasonics*, vol. 36, no. 7, pp. 813–824, 1998.
- [458] M. Hasegawa and J. Matsumura, “Measurement of surface SH-Wave velocities generated on the surface of Japanese cypress column,” *Open Journal of Acoustics*, vol. 4, pp. 177–183, 2014.

- [459] J. Zhu, S.-H. Kee, D. Han, and Y.-T. Tsai, “Effects of air voids on ultrasonic wave propagation in early age cement pastes,” *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 8, pp. 872–881, 2011.
- [460] K. Beezley, “Determination of strain patterns across the root-stem transition zone in trees,” MSc. Thesis, West Virginia University, Morgantown, USA, 2016.
- [461] M. Hasegawa, M. Takata, J. Matsumura, and K. Oda, “Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood,” *Ultrasonics*, vol. 51, no. 3, pp. 296–302, 2011.
- [462] A. Mishiro, “Ultrasonic velocity in wood and its moisture content I. Effects of moisture gradients on ultrasonic velocity in wood,” *Mokuzai Gakkaishi*, vol. 41, no. 12, pp. 1086–1092, 1995.
- [463] J. L. Sandoz, “Sorting and timber reliability,” Ph.D. dissertation, Departement de Génie Civil, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Suisse, 1990.
- [464] J. L. Sandoz, “Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading,” *Wood Science and Technology*, vol. 27, no. 5, pp. 373–380, 1993.
- [465] R. Steiger and M. Arnold, “Strength grading of Norway spruce structural timber: Revisiting property relationships used in EN 338 classification system,” *Wood Science and Technology*, vol. 43, no. 3–4, pp. 259–278, 2009.
- [466] M. Montero, “Grading of structural large cross-section timber of *Pinus sylvestris* L. by nondestructive methods,” Ph.D. dissertation, ETS de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain, 2013.
- [467] G. Íñiguez-González, F. Arriaga, M. Esteban, and D. Llana, “Reference conditions and modification factors for the standardization of nondestructive variables used in the evaluation of existing timber structures,” *Construction and Building Materials*, vol. 101, no. 2, pp. 1166–1171, 2015.
- [468] *Non destructive testing-Ultrasonic testing-Mechanical classification of dicotyledonous sawn wood*, Norma Brasileira Regulamentadora NBR 15521, 2007.
- [469] F. Arriaga, G. Íñiguez, M. Esteban, and J. I. Fernández-Golfín, “Structural Tali timber (*Erythrophleum ivorense* A. Chev., *Erythrophleum suaveolens* Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods,” *Holz als Roh - und Werkstoff*, vol. 64, no. 5, pp. 357–362, 2006.
- [470] V. Bucur, “Ultrasonic waves into the wood. mechanical characterization and quality of certain types of wood,” Ph.D. dissertation, Intitut Supérieur des Matériaux, Paris, France, 1984.
- [471] L. Acuña, R. Diez, L. Martin, M. Casado, A. Basterra, G. Ramon, and E. Relea, “Ultrasonic transmission technique apply on structural lumber,” *Asociación Española de Ensayos no Destructivos, 11º Congreso Español de END*, Gijón, Spain 2007, pp. 91-102.
- [472] F. Arriaga, G. Íñiguez, M. Esteban, and I. Bobadilla, “Proposal of a methodology for the assessment of existing timber structures in Spain,” *16th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Beijing, China, 2009, pp. 145-151.

- [473] A. Bartholomeu, “Timber classification using ultrasound,” Ph.D. dissertation, School of Agricultural Engineering, University of Campinas, Campinas, Brasil, 2001.
- [474] N. Waubke, “Basic investigations on the suitability of ultrasound pulse propagation time measurements as simplified and more precise methods for the classification of wood,” Ph.D. dissertation, Institut für Baustoffkunde und Bauphysik, Universität der Bundeswehr München, München, Deutschland, 1981.
- [475] N. Waubke, “Use of ultrasonic pulse measurement for the sorting of timber,” *Holzbauforschung*, pp. 152–154, 1988.
- [476] O. Estévez and E. Sánchez, “Efficiency of acoustic segregation of *Castanea sativa* standing trees and logs for structural timber production,” *19th Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, Rio de Janeiro, Brasil, 2015, p. 167.
- [477] M. Ivković, W. J. Gapare, A. Abarquez, J. Ilic, M. B. Powell, and H. X. Wu, “Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine,” *Wood Science and Technology*, vol. 43, no. 3–4, pp. 237–257, 2009.
- [478] R. Hori, M. Müller, U. Watanabe, H. Lichtenegger, P. Fratzl, and J. Sugiyama, “The importance of seasonal differences in the cellulose microfibril angle in softwoods in determining acoustic properties,” *Journal of Materials Science*, vol. 37, pp. 4279–4284, 2002.
- [479] M. Hasegawa and Y. Sasaki, “Acoustoelastic birefringence effect in wood I: Effect of applied stresses on the velocities of ultrasonic shear waves propagating transversely to the stress direction,” *Journal of Wood Science*, vol. 50, no. 1, pp. 47–52, 2004.
- [480] V. Bucur and F. Feeney, “Attenuation of ultrasound in solid wood,” *Ultrasonics*, vol. 30, no. 2, pp. 76–81, 1992.
- [481] S. Cochran, “Piezoelectricity and basic configurations for piezoelectric ultrasonic transducers,” in *Ultrasonic Transducers: Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications*, K. Nakamura, Ed. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2012, pp. 3–35.
- [482] A. Bartholomeu, R. Gonçalves, and V. Bucur, “Dispersion of ultrasonic waves in Eucalyptus lumber as a function of the geometry of boards,” *Scientia Forestalis*, vol. 63, no. 1, pp. 235–240, 2003.
- [483] Y. Z. Erdil, E. Haviarova, and C. A. Eckelman, “Product engineering and performance testing in relation to strength design of furniture,” *Wood and Fiber Science*, vol. 36, no. 3, pp. 411–416, 2004.
- [484] F. F. P. Kollmann, E. Kuenzi, and A. J. Stamm, *Principles of Wood Science and Technology II Wood Based Materials*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975.
- [485] M. Spycher, F. W. M. R. Schwarze, and R. Steiger, “Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties,” *Wood Science and Technology*, vol. 42, no. 4, pp. 325–342, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Murat AYDIN
Doğum Tarihi ve Yeri : 1981 Trabzon
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : murataydin@sdu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Kompozit Malzeme Teknol.	Düzce Üniversitesi	2018
Y. Lisans	Orman Endüstri Müh.	İstanbul Üniversitesi	2012
Lisans	Mobilya Dekorasyon Öğr.	Dumlupınar Üniversitesi	2008
Önlisans	Elektronik Haberleşme	Marmara Üniversitesi	2003
Lise	Gemi Elektroniği ve Haberleş.	Ziya Kalkavan Anadolu T.L.	1999