

# Yapı Kerestelerinde Eğilme Özelliklerinin İncelenmesinde Akustik Esaslı Tahribatsız Test Yöntemlerinin Karşılaştırılması

\*Hızır Volkan GÖRGÜN<sup>1</sup>, Türker DÜNDAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü,34473, İstanbul

\*Sorumlu Yazar: volkan.gorgun@istanbul.edu.tr

Geliş Tarihi:12.07.2016

## Özet

Bu çalışmada, ahşap yapı kerestelerinde eğilme özelliklerinin belirlenmesinde, iki akustik esaslı tahribatsız test yönteminin etkinliği karşılaştırılmıştır. Bu amaçla 53 adet karaçam (*Pinus nigra var. pallasiana Arnold.*) kereste üzerinde tahribatsız test yöntemlerinden stres dalga ve boyuna vibrasyon yöntemleri, tahribatlı test yöntemlerinden statik eğilme direnci ve elastikiyet modülü testleri uygulanmıştır ve sonuçları istatistiki açıdan karşılaştırılmıştır. Test sonuçları incelendiğinde; elastikiyet modülünün tayininde boyuna vibrasyon yönteminin, stres dalga yöntemine oranla daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Eğilme direncinin belirlenmesinde, kusurlarla ilgili ekstra bir değerlendirme yapılması önerilmektedir (Bu çalışma, 6-8 Nisan 2016 tarihleri arasında düzenlenen IMSTEC 2016 - Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknoloji Konferansı'nda sözlü bildiri olarak sunulmuştur).

**Anahtar kelimeler:** Stres dalga, Boyuna vibrasyon, Tahribatsız test yöntemleri, Eğilme

## Comparison Of Acoustic-Based Nondestructive Test Methods For Assessing The Bending Properties Of Lumbers

### Abstract

In this study, efficient of two acoustic-based non-destructive test methods were compared for determining of elastic properties on wooden structural beams. For this purpose, stress wave and longitudinal vibration non-destructive test methods and modulus of elasticity and bending strength destructive test methods were performed on 53 Black Pine (*Pinus nigra var. pallasiana Arnold.*) structural lumbers. Statistically compared results showed that; longitudinal vibration method was better than stress wave method for determining the modulus of elasticity. For determining the bending strength, it is suggested that defects should be considered for better prediction (This paper was presented in IMSTEC 2016 - International Material Science and Technology in Cappadocia Conference which was held on April 6-8, 2016).

**Keywords:** Stress wave, Longitudinal vibration, Non-destructive test methods, Bending, Structural lumber.

### Giriş

Ağaç malzeme (ahşap), düşük yoğunluğuna karşı yüksek dirence sahip olması, ısı ve ses iletkenliğinin düşük olması, kolay işlenebilir olması gibi sayısız avantajlarından dolayı yapı malzemesi olarak tercih edilmektedir. Diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında yenilenebilir bir kaynaktan elde edilmesi, atıklarının çevreye zarar vermemesi, üretiminde ve kullanımında düşük enerji sarfiyatı ve daha düşük CO<sub>2</sub> emisyonu olması gibi üstünlüklerinden dolayı ekolojik açıdan da ön plana çıkmaktadır (As, 2007). Ancak doğal ve organik bir malzeme olan ağaç malzemenin yapı malzemesi olarak kullanımında bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Ağaç malzemenin heterojen

ve anizotropik yapıda olması, doğal ve sonradan oluşabilecek kusurlar barındırabilmesi sebebiyle özellikleri geniş varyasyonlarda olabilmektedir. Bununla birlikte ağacın yetişme yeri şartları, gövde kusurları gibi nedenlerden aynı ağaçtan elde edilen iki kerestenin özellikleri de aynı olmayabilmektedir. Bu durum her bir ağaç malzemenin özelliklerinin ayrı ayrı tespit edilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

Ahşabın özelliklerinin belirlenmesinde geleneksel olarak tahribatlı test yöntemleri kullanılmaktadır. Birçok türünde malzeme kırılana ve/veya deforme olana kadar teste devam edilen bu tür yöntemlerde kesin sonuçlar elde edilmesine karşın, kırılan ve/veya deforme olan malzeme bir daha kullanılamamaktadır. Elde edilen değerler

artık kullanılamayacak bir malzeme için kesin olup, örnekleme yapıldığı ana toplum nitelikleri istatistiksel yöntemler ile hesaplanmaktadır. Ayrıca bu tür testler ciddi bir laboratuvar altyapısına ihtiyaç duymaktadır. Bu dezavantajlarından dolayı tahribatlı test yöntemlerine alternatif olarak tahribatsız test yöntemleri geliştirilmiştir.

Tahribatsız test yöntemlerinde malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri, malzemeye zarar vermeden, son kullanım yeri performansı ve ekonomik değeri etkilenmeden belirlenebilmektedir (Ross ve ark., 1998). Değerlendirmenin yapıldığı malzemede görsel karakteristiklerin incelenmesinin yanı sıra malzemenin elektriksel, akustik, termik, mekanik vb. özellikleri incelenmektedir. Malzemenin bu özelliklerinin ölçülmesi ve analiz edilmesi suretiyle, diğer nitelikleri arasında istatistiksel olarak ilişkileri araştırılmaktadır. Yapılan çalışmalarda, elde edilen bulguların tahribatlı test yöntemleriyle arasında güçlü ilişkiler bulunduğu tespit edilmiştir (Gerhards, 1982a; Gerhards, 1982b; Sandoz, 1989; Falk ve ark., 1990; Sandoz, 1991; Bucur, 2003; Güntekin ve Yılmaz, 2012).

Bu özelliklerden akustik davranışın incelenmesi, özellikle Jayne (1959) tarafından tanımlanan temel hipotez ile ortaya konulmuştur. Jayne'e göre, katı bir malzemede, enerji depolanması (dalga hızı) ve enerjinin soğurulması (dalganın enerjisini kaybetmesi) karakteristikleri, malzemenin mekanik özelliklerini belirleyen aynı mekanizma tarafından kontrol edilmektedir (Falk ve ark., 1990). Daha sonra Galligan ve Courteau (1965) ve Bertholf (1965) tarafından yapılan çalışmalar da Jayne'in hipotezini doğrulamıştır (Kaiserlik ve Pellerin, 1977; Pellerin, 1965; Ross ve Pellerin, 1988).

Masif ağaç malzemede ses iletim hızı, malzeme yoğunluğu ve dinamik elastikiyet modülü arasında aşağıdaki ilişki bulunmaktadır (Hearmon, 1966) (Eşitlik 1):

$$MOEd = \frac{v^2 \cdot d}{1000}$$

Burada;

MOEd = Dinamik elastikiyet modülü (N mm<sup>-2</sup>)

V = Ses dalgası iletim hızı (m ms<sup>-1</sup>)

d = Yoğunluk (g cm<sup>-3</sup>)

Ahşapta ses iletim hızı, belli bir mesafede

ses dalgalarının geçiş süresi ölçülerek aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir (Eşitlik 2):

$$Vs = \frac{L}{t} \cdot 1000$$

Burada;

Vs = Ses dalgası iletim hızı (m ms<sup>-1</sup>)

L = Sensör mesafesi (m)

t = Geçiş süresi (ms)

Ahşapta ses iletim hızı aynı zamanda vibrasyon sırasında oluşan rezonans frekansının ölçülmesi ile aşağıdaki eşitlik üzerinden hesaplanabilmektedir (Eşitlik 3):

$$Vv = 2 \cdot x \cdot fr \cdot l$$

Burada;

Vv: Ses dalgası iletim hızı (m ms<sup>-1</sup>)

fr: Vibrasyon frekansı (MHz)

l: Örnek uzunluğu (m)

Ses dalga geçiş süresinin ölçülmesinde piezoelektrik özellikte sensörler ve zaman ölçerler kullanılmakta iken, vibrasyon frekansının belirlenmesinde yine piezoelektrik özellikte sensörler ve osiloskoplar kullanılmaktadır. Her iki durumda da belirlenen ses dalga hızı değeri dinamik elastikiyet modülünün hesaplanmasında kullanılmaktadır. Dinamik elastikiyet modülü ile, statik elastikiyet modülü ve statik direnç değerleri arasındaki korelasyon ve regresyon denklemleri kullanılmak suretiyle test edilen malzemenin statik elastikiyet modülü ve direnç değerleri hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, ses dalga geçiş süresi ve vibrasyon frekansı ölçülmek suretiyle tespit edilen dinamik elastikiyet modülü değerleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi, aynı zamanda her iki yöntemle tespit edilen dinamik elastikiyet modülü değerlerinin, statik eğilme direnci ve eğilme elastikiyet modülü değerlerinin belirlenmesindeki başarılarının karşılaştırılmasıdır.

### Materyal ve Metot

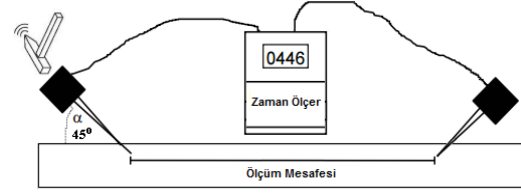
Bu çalışmada 60 mm x 80-120 mm x 2000 mm (kalınlık×genişlik×uzunluk) ölçülerinde ve ortalama %15.4 rutubet içeriğine sahip 53 adet Karaçam (*Pinus nigra var. pallasiana* Arnold.) kerestesi kullanılmıştır. Seçilen keresteler farklı miktarlarda kusurlar içermektedir ve bu kusurlar malzemenin eğilme özelliklerini etkileyen en önemli

unsurlardandır. Bu sebeple keresteler seçilirken, TS 1265 (1973) standardı referans alınarak, I., II., III. sınıf ve sınıflandırma dışı olmak üzere her kalite sınıftan kerestelerin seçilmesine çalışılmıştır. Kerestelerin kalite sınıflarına dağılımları Tablo 1’de görülmektedir.

**Tablo 1.** Kerestelerin TS 1265 standardına göre kalite sınıflarına dağılımları

| TS 1265            | 1. Kalite (En İyi) Sınıfı | Adet | 20    |
|--------------------|---------------------------|------|-------|
|                    |                           | %    | 37.74 |
| 2. Kalite Sınıfı   | Adet                      | 15   |       |
|                    | %                         | 28.3 |       |
| 3. Kalite Sınıfı   | Adet                      | 14   |       |
|                    | %                         | 26.4 |       |
| Değerlendirme Dışı | Adet                      | 4    |       |
|                    | %                         | 7.55 |       |

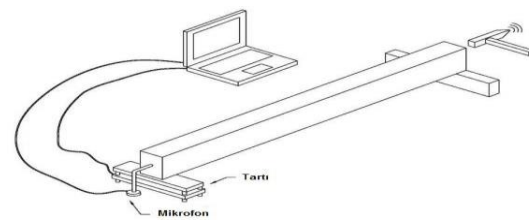
Seçilen keresteler üzerinde iki farklı yöntem kullanılarak dinamik elastikiyet modülü değerleri hesaplanmıştır. Kullanılan birinci yöntem stres dalga (SD) yöntemi olarak adlandırılmakta olup, malzeme içerisinde oluşturulan ses dalgalarının iki nokta arasındaki geçiş süresinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Şekil 1’de görüldüğü gibi, piezoelektrik özelliğe sahip çivi şeklinde iki sensör kereste yüzeyi ile en fazla 45° açı yapacak şekilde belli bir mesafede yerleştirilmiştir (endirekt ölçüm). Sensörlerden bir tanesi başlangıç sensörü, diğeri ise bitiş sensörüdür. Başlangıç sensörüne bir çekiç ile vurulmak suretiyle malzeme içerisinde bir gerilme dalgası oluşturulur ve sensörün bağlı olduğu zamanölçer aynı anda süreyi başlatır. Ses dalgası bitiş sensörüne ulaştığında ise zamanölçer süreyi durdurur. Böylece iki sensör arasında ses dalgalarının geçiş süresi (time of flight) ölçülmüş olmaktadır. Kerestelerin yoğunluğu kereste ağırlığının kereste hacmine oranlanması ile tespit edilmiştir. Ölçülen süre ve sensörler arasındaki mesafe kullanılarak ses iletim hızı Eşitlik 2 ile, sonrasında kereste yoğunluğu ve hesaplanan hız değeri kullanılarak kerestenin dinamik elastikiyet modülü (MOED) Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır.



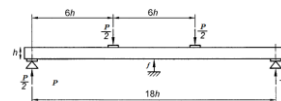
**Şekil 1.** Stres dalga yöntemi ile ses iletim süresi ölçümü

İkinci yöntemde boyuna vibrasyon (BV) frekansı kullanılmıştır. Bunun için boyut ölçümlerinin yapıldığı keresteler, yumuşak poliüretan yastıkları bulunan iki destek üzerine basitçe mesnetlenmiştir. Poliüretan köpüğün işlevi kerestenin temasta bulunduğu nesnelere izole edilmesidir. Kullanılan desteklerden biri aynı anda numunenin ağırlığını da tartmaktadır. Numunenin bir ucuna çekiç ile vurulmasıyla oluşturulan ses dalgası (vibrasyon), numunenin diğer ucuna bulunan yerleştirilen hassas dinamik mikروفon tarafından algılanmakta ve bilgisayarda bulunan dijital bir osiloskopa aktarılmaktadır (Şekil 2). Osiloskopta malzemede oluşan boyuna vibrasyonun frekansı tespit edilmiş ve bu ölçülen bu frekans ve kereste uzunluğu kullanılarak Eşitlik 3 ile ses dalgası iletim hızı hesaplanmıştır. Sonrasında Eşitlik 1 ile dinamik elastikiyet modülü hesaplanmıştır.

Tahribatsız denemeler tamamlandıktan sonra kerestelerde statik eğilme direnci ve eğilmede global elastikiyet modülü deneyleri TS EN 408 (1997) standardına göre yapılmıştır. Bu standartta belirtilen dört noktalı eğilme testlerinin deney düzeneği Şekil 3’te görülmektedir.



**Şekil 2.** Boyuna vibrasyon yöntemi ile vibrasyon frekansının ölçülmesi



**Şekil 3.** Statik eğilme ve eğilmede elastikiyet modülü test düzeneği

Bu standarda göre global statik elastikiyet modülü (MOEt) Eşitlik 4'teki ve eğilme direnci (ED) Eşitlik 5'teki formülle elde edilmektedir:

$$MOEt = \frac{(L_0)^3 \cdot (P_2 - P_1)}{b \cdot h^3 \cdot (f_2 - f_1)} \cdot \left[ \left( \frac{3a}{4L_0} \right) - \left( \frac{a}{L_0} \right)^3 \right]$$

Burada;

MOEt: Tahribatlı test ile bulunan statik elastikiyet modülü (N mm<sup>-2</sup>)

L<sub>0</sub>: Mesnet açıklığı (mm)

P: Yük (N)

a: Yükleme noktası ile en yakın mesnet arasındaki mesafe (6h) (mm)

h: Örnek yüksekliği (mm)

f: Sehim miktarı (mm)

$$ED = \frac{F_{max} \cdot a}{2 \left( \frac{b \cdot h^2}{6} \right)}$$

Burada;

F<sub>max</sub>: En büyük yük (N)

b: Örnek genişliği (mm)

### Bulgular

Akustik esaslı tahribatsız test yöntemlerinden SD ve BV yöntemiyle elde edilen sonuçlar Tablo 2'de görülmektedir.

**Tablo 2.** Stres dalga ve boyuna vibrasyon yöntemleri ile elde edilen hız ve dinamik elastikiyet modülü değerleri

| Yöntem                               | Aritmetik Ortalama | Standart Sapma | Var. Kat. (%) |
|--------------------------------------|--------------------|----------------|---------------|
| V <sub>s</sub> (m sn <sup>-1</sup> ) | 5117.2             | 316.24         | 6.18          |
| V <sub>v</sub> (m sn <sup>-1</sup> ) | 4806.4             | 437.00         | 9.10          |
| MOEs (N mm <sup>-2</sup> )           | 13799.35           | 2390.57        | 17.32         |
| MOEv (N mm <sup>-2</sup> )           | 12062.26           | 2571.83        | 21.33         |

Tablo 2'de görüleceği üzere, stres dalga hem BV hem de SD yöntemiyle elde edilen stres dalga geçiş hızı değerleri, literatürde (As ve Dündar, 2010) belirtilen akustik dalga geçiş hızı değerleri (3914-5525 m sn<sup>-1</sup>) ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak her iki tahribatsız test yönteminden elde edilen stres dalga geçiş hızı ve elastikiyet modülü değerlerinin birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların istatistikî olarak anlamlı olup olmadığının anlaşılması için t-testleri uygulanmıştır ve sonuçlar Tablo 3 ve Tablo 4'te gösterilmiştir.

**Tablo 3.** BV - SD yöntemleri akustik dalga geçiş hızı ve elastikiyet modülü fark testleri

| *Anlamlı (p<0.05)               | Aritmetik Ortalama |
|---------------------------------|--------------------|
| V <sub>s</sub> - V <sub>v</sub> | 0.000*             |
| MOEs - MOEv                     | 0.000*             |

Elde edilen sonuçlara göre, her iki yöntemle elde edilen değerler anlamlı (p<0.05) bir şekilde birbirlerinden farklı çıkmıştır.

Tahribatsız ölçümler sonrası aynı keresteler tahribatlı testlere de tabi tutulmuştur ve sonuçları Tablo 4'te görülmektedir.

**Tablo 4.** Karaçam yapı kerestelerinde yapılan tahribatlı test sonuçları

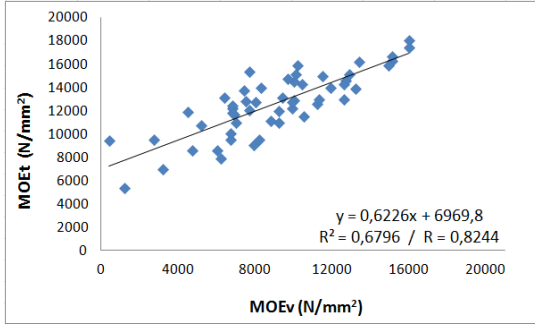
|                    | MOEt (N mm <sup>-2</sup> ) | ED (N mm <sup>-2</sup> ) |
|--------------------|----------------------------|--------------------------|
| Aritmetik Ortalama | 12591.64                   | 66.26                    |
| Standart Sapma     | 2700.6                     | 18.62                    |
| Var. Katsayısı (%) | 21.45                      | 28.1                     |

Tablo 4'te görüldüğü gibi, elde edilen değerlerden elastikiyet modülü değeri, literatürde Karaçam için verilen elastikiyet modülü değerine (10860 N mm<sup>-2</sup>) oranla yüksek çıkmıştır (Wood Database, 2015). Eğilme direnci değeri ise, literatürde Karaçam için verilen değere (107.48 N mm<sup>-2</sup>) oranla düşük çıkmıştır (Bozkurt ve Göker, 1996).

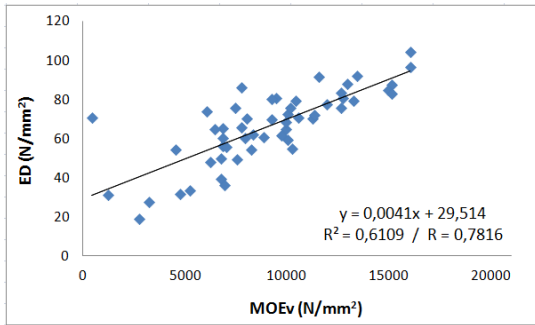
Akustik esaslı tahribatsız yöntemlerin etkinliğinin sorgulanabilmesi için, tahribatlı yöntemlerle karşılaştırılmıştır. yapılan karşılaştırmalarda, regresyon analizi ile elde edilen belirlilik (R<sup>2</sup>) ve korelasyon (R) katsayıları Tablo 5'te verilmiştir. Hem elastikiyet modülü hem de eğilme direnci için en iyi katsayılar sahip ölçümlerin grafikleri Şekil 4 ve Şekil 5'te görülmektedir.

**Tablo 5.** Tahribatsız ve tahribatlı yöntemlerin karşılaştırılmasında regresyon analizi sonuçları

|             | R <sup>2</sup> | R      |
|-------------|----------------|--------|
| MOEs - MOEt | 0.6425         | 0.8016 |
| MOEv - MOEt | 0.6796         | 0.8244 |
| MOEs - ED   | 0.3736         | 0.6112 |
| MOEv - ED   | 0.6109         | 0.7816 |



Şekil 4. BV statik elastikiyet modülü - tahribatlı statik elastikiyet modülü karşılaştırması



Şekil 5. BV statik elastikiyet modülü - tahribatlı statik elastikiyet modülü karşılaştırması

### Tartışma ve Sonuç

Elde edilen sonuçlara göre, elastikiyet modülünün belirlenebilmesi için, bu iki akustik dalga esaslı tahribatsız test yöntemlerinin kullanılabilirliği söylenebilir.

Yöntemler karşılaştırıldığında, stres dalga yönteminin, boyuna vibrasyon yöntemine oranla tahribatlı değerlerle ilişkisinin daha düşük çıktığı görülmektedir. Bunda yöntemlerin ölçüm prensiplerinin farkının etki ettiği söylenebilir. Çünkü stres dalga yönteminde sadece malzeme içerisinde ilerleyen akustik dalganın en yüksek hızı referans alınmaktadır. Bu dalga da sadece 2 sensör arasında bulunan dar bir hattı taramaktadır. Dar bir ilerleme hattı, ağaç malzeme gibi heterojen yapıdaki bir malzemenin bütünü temsil etme veya bu hat dışında kalan kusurlardan etkilenme konusunda eksiklikleri olduğu düşünülmektedir. Yöntemin etkinliğinin artırılması amacıyla, birden fazla ölçüm yapılarak, tahribatlı değerlerle olan ilişki artırılabilir de düşünülmektedir.

Boyuna vibrasyon yönteminin ölçüm

prensipte ise, bütün malzeme içerisinde ilerleyen vibrasyon frekansının dalga spektrumunu incelemektir. Böylelikle, malzeme içerisinde bulunan ve akustik dalgayı etkileyebilecek tüm kusurlar dikkate alınmış olmaktadır.

Karşılaştırma yapılan direnç türlerine bakıldığında; Çizelge 5'te de görüldüğü üzere, akustik dalga esaslı tahribatsız test yöntemleriyle elde edilen değerlerin, tahribatlı test yöntemleriyle elde edilen statik elastikiyet modülü değerleriyle ilişkisinin daha kuvvetli olduğu görülmektedir. Bu durumun, ağaç malzemenin elastikiyetini belirleyen özelliklerin, akustik dalga geçişini ve malzeme vibrasyonunu etkileyen özelliklerle benzer olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bununla birlikte akustik dalga esaslı tahribatsız yöntemlerden elde edilen değerlerin, tahribatlı yöntemlerle elde edilen eğilme direnci değerleriyle ilişkisinin, elastikiyet modülü kadar kuvvetli olmadığı görülmektedir. Sebep olarak; elastikiyet modülü testleri, tahribatlı test prosedürüne göre gerçekleştirilse de, elastik sınıra kadar olan yüklemelerde gerçekleştirildiği için, elde edilen değerler kusurlardan daha az etkilenmektedir. Ayrıca elastikiyet modülünü etkileyen malzeme parametreleri, malzemenin maksimum yüke dayanacağı kuvveti (mukavemeti) belirleyen parametrelerden farklıdır. Mukavemeti belirleyen en önemli unsurlar da ağaç malzemedeki kusurlar olduğu için, tahribatsız yöntemlerle eğilme direncinin daha yüksek doğrulukla hesaplanabilmesi için, kusurların değerlendirildiği dönüşüm faktörlerinin de eklenmesi gerektiği söylenebilir.

Ayrıca bu çalışmada olduğu gibi, bir ağaç türüyle ilgili mekanik değerler için gösterilen referanslar, küçük boyutlu ve kusursuz numunelerde elde edilerek literatüre kazandırılmıştır. Ancak büyük boyutlu örnekler, ağacın anatomik yapısı nedeniyle çok büyük oranda kusur içermekte ve bu kusurlar mekanik değerleri azaltıcı yönde etki etmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada tahribatlı olarak elde edilen statik elastikiyet modülü değerlerinin düşük çıkması normal karşılanabilir.

Sonuç olarak, yapısal boyutta kullanılan Karaçam kirişlerin eğilme özelliklerinden

statik elastikiyet modülünün belirlenmesi için, akustik esaslı tahribatsız test yöntemleri kullanılabilir. Eğilme direncinin belirlenmesinde ise tahribatsız test yöntemlerinin kullanılması için, kusurların dikkate alındığı bir dönüşüm katsayısı kullanılması önerilmektedir.

### Kaynaklar

As N., 2007. Ahşabın Yapıda Kullanımı Lisans Ders Notu Ders Notu (Yayınlanmamış). İstanbul Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

As N., Dündar T., 2010. Tarihi Ahşap Yapıların Korunması ve Restorasyonunda Tahribatsız Değerlendirme Yöntemlerinin Kullanımı, 5. Ulusal Yapı Malzemeleri Kongresi ve Sergisi, 3-5 Kasım 2010, Özdil Basımevi, 291-303, İstanbul, Türkiye.

Bertholf L.D., 1965. Use of Elementary Stress Wave Theory for Prediction of Dynamic Strain in Wood. Bulletin 291, Technical Extension Service, Washington State University, Pullman, WA.

Bozkurt A. Y. ve Göker Y., 1996. Fiziksel ve Mekanik Ağaç Teknolojisi, İ.Ü. Orman Fakültesi Yayınları, O.F. Yayın No. 436, ISBN 975-404-42-1.

Bucur V., 2003. Nondestructive Characterization and Imaging of Wood. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag New York, LLC, ISBN: 3540438408.

Falk R.H., Patton-Mallory M., McDonald K.A., 1990. Nondestructive Testing of Wood Products and Structures: State - of - the - Art and Research Needs. USDA Forest Service, Forest products Laboratory Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 137-147.

Galligan W. L., Courteau R.W., 1965. Measurement of Elasticity of Lumber With Longitudinal Stress Waves and the Piezoelectric Effect of Wood. Proceedings of the Second Symposium on the Nondestructive Testing of Wood, Washington State University, Pullman, WA.

Gerhards C., 1982. Effects of knots on stress waves in lumber. Res Pap 384. Forest Products Laboratory, USDA, Washington DC.

Gerhards C., 1982. Longitudinal stress waves for lumber stress grading. Factors affecting applications: state of the art. Forest Prod J, 32 (2), 20-25.

Güntekin E., Yılmaz T., 2012. Kızılcım (*Pinus brutia Ten.*) kerestesi için direnç sınıflandırması. SDÜ Orman Fakültesi Dergisi, 13: 140-142.

Hearmon R.F.S., 1966. Theory of the Vibration Testing of Wood. Forest Products Journal, 16 (8), 29-40.

Jayne B.A., 1959. Vibrational properties of wood as indices of quality, Forest Product Journal, 9 (11), 413- 416.

Kaiserlik J.H., Pellerin R. F., 1977. Stress Wave Attenuation as an Indicator of Lumber Strength. Forest Products Journal 27 (6), 39-43.

Pellerin R.F., 1965. Vibrational Approach to Nondestructive Testing of Structural Lumber. Forest Products Journal, 15 (3), 93-101.

Ross R.J., Bradshaw B.K., Pellerin R.F., 1998. Nondestructive evaluation of wood. Forest Product Journal, 48, 14-19.

Ross R.J., Pellerin R.F., 1988. NDE of Wood - Based Composites With Longitudinal Stress Waves. Forest Products Journal 38 (5), 39-45.

Sandoz J.L., 1989. Grading of construction timber by ultrasound. Wood Sci Technol, 23, 95-108.

Sandoz J.L., 1991. Form and treatment effects on conical roundwood tested in bending. Wood Sci Technol, 25, 203-214.

The Wood Database, 2015, Austrian Pine (*Pinus nigra*), <http://www.wood-database.com/lumber-identification/softwoods/austrian-pine/> (Erişim Tarihi: 07.01.2016).

TS 1265, 1973. Kereste - İğne Yapraklı Ağaç Keresteleri - Yapılarda Kullanım İçin. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 408, 1997. Ahşap Yapılar – Yapı Kerestesi ve Tutkallanmış Lamine Kereste – Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.