



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Termo-Mekanik Yoğunlaştırma ve Isıl İşlemin Doğu Kayını (*Fagus Orientalis* L.) Odununun Bazı Fiziksel Özelliklerine Etkisi

Hüseyin PELİT^{a,*}, Abdullah SÖNMEZ^b

^a Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: huseyinpelit@duzce.edu.tr

ÖZET

Çalışmada, Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) odununun bazı fiziksel özelliklerine termo-mekanik (TM) yoğunlaştırma ve ısıl işlem etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Örnekler, özel tasarlanmış hidrolik preste 110 °C ve 150 °C sıcaklıkta, %20 ve %40 sıkıştırma oranında radyal yönde sıkıştırılarak yoğunlaştırılmıştır. Daha sonra örnekler 190 °C, 200 °C ve 210 °C sıcaklıkta iki saat süre ile ısıl işlem uygulanmıştır. Fiziksel özelliklerde meydana gelen değişimleri tespit etmek için sıkıştırma oranı, geri esneme (spring-back) oranı, sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranı, sıkıştırma yönündeki (radyal) şişme (TS 4084) ve yoğunluk (TS 2472) testleri yapılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre; her iki sıkıştırma oranında (%20 ve %40), 110 °C'de yoğunlaştırılan örneklerin geri esneme oranı düşük ve yoğunluk artışı daha yüksek elde edilmiştir. Sıkıştırma işlemleri ile yoğunlukta %35'e kadar artış sağlanırken, ısıl işlem sonrası yoğunlukta %5'e kadar azalma olmuştur. Isıl işlem sıcaklığı artışına bağlı olarak sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş etkisi %83 oranında azalmış ayrıca geri esneme etkisinde %44, sıkıştırma yönündeki şişmede ise %74 oranında iyileşme sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğu kayını, Yoğunlaştırma, Isıl işlem, Fiziksel özellikler

The Effect of Thermo-Mechanical Densification and Heat Treatment on Some Physical Properties of Eastern Beech (*Fagus orientalis* L.) wood

ABSTRACT

In study, determination of effects thermo-mechanical (TM) densification and heat treatment on some physical properties of Eastern Beech (*Fagus orientalis* L.) wood were aimed. Samples were densified in the radial direction by a specially designed hydraulic press machine with compression ratios of 20% and 40%, and at 110 °C and 150 °C. Then, heat treatment was applied to the samples during 2 h at temperatures 190 °C, 200 °C and 210 °C. In order to determine the changes occurred in physical properties, tests of compression ratio, spring-back ratio, compression thickness recovery ratio, swelling (TS 4084) in compression direction (radial), and density (TS 2472) were conducted. According to results of the research, at the both compression ratio (20% and 40%), lower spring-back ratio and higher density increase were observed in the samples densified at 110 °C. While an increase of 35% in density was being obtained by compression, decreases up to 5% were observed after heat treatment. Depending on the increase in heat treatment temperature, effects of compression thickness recovery decreased at a rate of 83%, and improvement of 44% in spring-back effect, also an improvement of 74% in swelling in compression direction were achieved.

Keywords: Eastern Beech, Densification, Heat treatment, Physical properties

I. GİRİŞ

BAZI fiziksel ve kimyasal işlemler ile ağaç malzemenin direnci, sertliği, su iticilik ve boyutsal stabilizasyonu arttırılabilmektedir. Bu işlemler; sertleşme sonrası çözünmeyen su bazlı polimerler veya sentetik reçinelerle muamele, hücre çeperi polimerlerinin organik kimyasallar veya çapraz bağlama maddeleri ile bağlanması, ahşap hücre lümenlerinde sıvı monomerlerin polimerizasyonu, ağaç malzemenin sıkıştırılarak veya reçine emdirilerek yoğunlaştırılması ve ısı ile muameledir [1].

Ağaç malzemenin yoğunluğu, onun diğer özellikleri ve kullanım imkanları hakkında fikir veren önemli bir faktördür. Örneğin ağır odunun direnci, esnekliği ve sertliği hafif odundan daha fazladır [2]. Düşük yoğunluklu ve ticari olarak ilgi çekici olmayan ağaç türleri yoğunlaştırma işlemleri ile modifiye edilerek, yüksek performanslı ve değerli ürünler haline getirilebilir. Yoğunluğu yüksek denebilecek ağaçlarda bile yoğunlaştırma işlemleri yapılarak sertlik ve direnç özellikleri daha da iyileştirilebilir [3-6]. Ağaç malzeme basınç altında sıkıştırılarak, hücre çeperinine bazı kimyasalların impregnasyonu ile veya sıkıştırma ve impregnasyonun birlikte kullanılmasıyla yoğunlaştırılabilmektedir [1,5]. Kimyasal maddelerle yoğunlaştırmada; sıvı haldeki doğal ve yapay reçinelerin, ağaç malzemenin boşluklarına emdirildikten sonra kimyasal reaksiyon veya soğutma sonucu buldukları yerde katılaştırılarak yoğunluğu artırılmış ağaç malzeme elde edilmektedir [7]. Sıkıştırarak yoğunlaştırmada ise, ağaç malzemenin boşluk hacmi azaltılır ve hücre çeperi çökertilerek yoğunlaştırma gerçekleştirilir [6,8]. Sıkıştırarak yoğunlaştırma yönteminin önemli bir dezavantajı, yoğunlaştırılmış ağacın yüksek seviyede neme veya suya maruz kalması halinde sıkıştırılmadan önceki başlangıç ölçülerine geri dönmesidir. Bu durum; suyun etkisi ile hücre çeperindeki genişleme, sıkıştırma nedeni ile malzeme yapısında oluşan iç gerilmelerin rahatlaması ve özellikle hücrenin eski şeklini geri alma eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır [6,9-14]. Ağaç malzemenin bazı özelliklerinin (boyutsal stabilite, biyolojik direnç v.b.) iyileştirilerek kullanım alanının genişletilmesine yönelik yapılan ve uygulaması her geçen gün artış gösteren ağaç malzeme modifikasyon yöntemlerinden birisi de ısıl işlemdir [6,14].

Isıl işlem, ağacın kimyasal bileşenlerinin moleküler yapısında kalıcı değişiklikler meydana getiren bir uygulamadır. Bu uygulamanın temel fikri kimyasal reaksiyonların hızlandığı yaklaşık 150 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ağaç malzemenin ısı ile muamele edilmesidir [15,16]. Ağaç malzemede ısıl işlem uygulamasının ticarileştirilebilmesi için uzun yıllardır ara verilmeksizin araştırmalar yapılmaktadır. Ahşap koruyucuların toksit etkisi, tropical sert ağaçların kullanımı hakkındaki genel tartışma, özellikle ahşap sanayinin ürün yelpazesini genişletmek ve üreticilerin istekliliği 2000'li yılların başından beri çeşitli ısıl işlem yöntemlerinin endüstriyel olarak geliştirilmesini sağlamıştır. Avrupa pazarında, çeşitli endüstriyel ısıl işlem yöntemleri sunulmuştur. Bunların içinde en yaygın olanları TermoWood yöntemi (Finlandiya), Plato yöntemi (Hollanda), Retification yöntemi (Fransa), Le Bois Perdure yöntemi (Fransa) ve Oil Heat Treatment (OHT) yöntemi (Almanya) dir [17].

Isıl işlem uygulaması odunun moleküler yapısının modifiye edilmesine yol açtığından performansını arttırmaktadır. Isıl işlem uygulaması ile artan potansiyel nitelikler; mantar ve böceklerle karşı biyolojik dayanıklılık, düşük denge rutubet içeriği, daralma ve genişlemedeki azalmaya bağlı olarak artan boyutsal stabilite, artan termal izolasyon kabiliyeti, boya adezyonu, dış hava şartlarına dayanıklılıkta artma, dekoratif renk çeşitliliği ve kullanım süresinde uzamadır [18]. Ancak bu uygulamanın önemli bir dezavantajı, ağaç malzemenin mekanik direnç özelliklerindeki azalmadır [6,16,18-24]. Ağaç malzeme modifikasyon yöntemlerinden olan yoğunlaştırma ve ısıl işlemin kombine edilerek kullanılması ile her iki yöntemin önemli bazı dezavantajlarının giderilebileceği düşünülmektedir. Bahsedilen bilgiler ışığında çalışmanın amacı, termo-mekanik yöntemle yoğunlaştırılmış Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) örneklerine ısıl işlem (ThermoWood yöntemi) uygulayarak elde edilen yeni malzemenin bazı fiziksel özelliklerini belirlemektir.

II. MATERYAL ve METOT

A. MATERYAL

A1. AĞAÇ MALZEMENİN HAZIRLANMASI

Bu çalışmada, geniş yapraklı ağaç türlerinden olan Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) kullanılmıştır. Örneklerin hazırlandığı Doğu kayını ağacı Ordu ili Akkuş Orman İşletme Müdürlüğü Akkuş İşletme Şefliği sahasından temin edilmiştir. Taze hal rutubetteki tomruk TS 2470'de belirtilen esaslara göre, otomatik kontrollü şerit testere makinesinde kuruma payı ve test örneği ölçüleri dikkate alınarak, yıllık halkalar yüzeye paralel (teğet kesit) gelecek şekilde ve diri odun kısımlarından kaba ölçüde kerestelere dönüştürülmüştür. Örneklerde çürük, budak, çatlak, renk ve yoğunluk farkı olmamasına dikkat edilmiştir [25]. Örnekler, önce otomatik yönetilen klasik kurutma fırınında ortalama %12 rutubete kadar kurutulmuş, daha sonra Tablo 1'de belirtilen ölçülere getirilmiştir.

Tablo 1. Örneklerin yoğunlaştırma öncesi ölçüleri

Sıkıştırma oranı (%)	Uzunluk-boyuna yön (mm)	Genişlik-teğet yön (mm)	Kalınlık-radyal yön (mm)
Kontrol	450	95	20,0
20	450	95	25,0
40	450	95	33,3

Örnekler, yoğunlaştırma işlemi öncesi TS 2471'e göre 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve bağıl nemi 65 ± 3 olan iklimlendirme kabininde değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar bekletilmiştir. İklimlendirme sonrası meydana gelebilecek rutubet değişikliklerini önlemek için örnekler, yoğunlaştırma anına kadar plastik poşetler içerisinde muhafaza edilmiştir [26].

A2. YOĞUNLAŞTIRMA

Örneklerin termo-mekanik (TM) yöntemle yoğunlaştırılması, tabla ebatları 60×60 cm² olan sıcaklık ve basınç kontrolü yapılabilen özel tasarlanmış hidrolik pres vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Yoğunlaştırma işlemi, 110 ± 5 °C ve 150 ± 5 °C sıcaklıkta, %20 ve %40 hedef sıkıştırma oranında 4 farklı varyasyon oluşturularak yapılmıştır. Yoğunlaştırma varyasyonları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Yoğunlaştırma varyasyonları

Araştırma Kodu	Presleme sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma oranı (%)	Süre (dak.)
A1	110	20	Isıtma + 10
A2	110	40	Isıtma + 10
B1	150	20	Isıtma + 10
B2	150	40	Isıtma + 10

Pres tablasına yerleştirilen örnekler ilk olarak, her iki yüzeyi pres tablasına temas edecek şekilde hafif bir basınç altında tutulmuş ve dijital ısı ölçerle kontrol edilerek örneklerin iç sıcaklığı pres tablalarının sıcaklık değerine ulaşmaya kadar bu pozisyonda bir süre bekletilmiştir. Daha sonra 60 mm/dak. yükleme hızında örneklerin radyal yönde sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hedeflenen sıkıştırma kalınlığını (20 mm) elde edebilmek için belli aralıklarla pres tablasına metal stoplama çitaları yerleştirilmiştir [6]. Yoğunlaştırılan örnekler 10 dakika süre ile basınç altında tutulmuş ve bu sürenin sonunda presten alınarak, geri esneme (spring-back) etkisini en aza indirmek amacı ile ortalama 5

kg/cm²'lik basınç altında oda sıcaklığına kadar soğuması sağlanmıştır. Yoğunlaştırma sonrası örneklerin ortalama rutubet miktarı 110 °C'de yoğunlaştırılanlar için %5,1 ve 150 °C'de yoğunlaştırılanlar için %2,7 olarak belirlenmiştir.

A3. ISIL İŞLEM

Deney örneklerinde boyutsal stabilitenin sağlanması amacı ile ısı işlem uygulaması yapılmıştır. Isıl işlem uygulaması, ThermoWood Handbook (2003)'de tanımlanan metoda göre, üç aşamada (yüksek sıcaklıkta kurutma, ısı işlem, soğutma ve kondisyonlama) gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada ısı ve buhar kullanılarak fırın sıcaklığının hızlı bir şekilde artırılması ile yaklaşık %0 rutubete kadar kurutulmuş olan örnekler ikinci aşamada, hedeflenen üç farklı sıcaklıkta (190 °C, 200 °C ve 210 °C) iki saat süre ile ısı işlem uygulanmıştır. Üçüncü aşamada ise sıcaklık düşürülüp su spreyi kullanılarak örneklerin rutubet miktarının yaklaşık %4-6'ya ulaşması sağlanmıştır [27].

Isıl işlem uygulamasından sonra deney örnekleri düzgün bir şekilde istiflenerek 2-3 hafta süre ile 20±2 °C sıcaklık ve %65±3 bağıl nem koşullarında dinlendirilmiştir. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi için örnekler 30 x 20 mm (uzunluk-boyuna yön x genişlik-teğet yön) ölçülerinde (kalınlık-radyal yön sabit kalmıştır) ve her bir test değişkeni için 10 tekrarlı olacak sayıda kesilmiştir. Sıkıştırma yönü şişme testi ve hava kurusu yoğunluk testi için kullanılacak örnekler ilgili standartlar gereğince 20 mm kalınlıkta (radyal yön) ölçülandırılmıştır. Kesim sonrası oluşabilecek rutubet farklılıklarını gidermek için örnekler, TS 2471'e göre 20±2 °C sıcaklıkta ve bağıl nemi %65±3 olan iklimlendirme kabini içinde değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar tekrar bekletilmiştir [26]. İklimlendirme sonrası rutubet değişimlerini önlemek için örnekler, ölçüm anına kadar plastik poşetler içerisinde muhafaza edilmiştir.

B. METOT

B1. SIKIŞTIRMA ORANI, GERİ ESNEME ORANI ve SIKIŞTIRMA KALINLIĞINDAKİ GERİ DÖNÜŞ ORANININ BELİRLENMESİ

Örnekler, sıcak preste hedeflenen iki farklı oranda (%20 ve %40) sıkıştırılmıştır. Ancak pres basıncının ortadan kalkmasından sonra, sıkıştırma nedeniyle oluşan iç gerilmelerin serbest kalmasından kaynaklanan anlık bir geri esneme olmuştur. Buna ilaveten sıkıştırma sürecinde sıcaklığının etkisi ile örneklerde meydana gelen rutubet kayıpları, örneklerin 20±2 °C sıcaklık ve %65±3 bağıl nem koşullarında iklimlendirilmesinden sonra ayrıca bir geri esnemeye yol açmıştır. Bunun sonucunda, presleme aşamasındaki hedeflenen sıkıştırma oranlarında değişimler (azalma) meydana gelmiştir. Bu değişimler sonucu gerçekleşen sıkıştırma oranları (SO) Eş. 1'e göre, geri esneme (spring-back) oranları (GEO) Eş. 2'ye göre belirlenmiştir. Ayrıca, 20±2 °C sıcaklıktaki su içerisinde 672 saat süre ile bekletilen yoğunlaştırılmış ve ısı işlem görmüş Doğu kayını örneklerinin sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranı (GDO) Eş. 3'e göre belirlenmiştir.

$$SO = [(K_1 - K_3) / K_1] \times 100 \quad [\%] \quad (1a)$$

$$GEO = [(K_3 - K_2) / K_2] \times 100 \quad [\%] \quad (1b)$$

$$GDO = [(K_4 - K_3) / (K_1 - K_3)] \times 100 \quad [\%] \quad (1c)$$

Burada, K₁; sıkıştırma öncesi hava kurusu rutubetteki (20±2 °C / %65±3 RH) kalınlık, K₂; basınç altındaki kalınlık, K₃; sıkıştırma sonrası hava kurusu rutubetteki (20±2 °C / %65±3 RH) kalınlık, K₄; suda bekletme sonrası kalınlıktır [28-30]. Kalınlıklar ±0,01 mm hassasiyetindeki kumpasla belirlenmiştir.

B2. RADYAL SIKIŞTIRMA YÖNÜ ŞİŞME ORANININ BELİRLENMESİ

Sıkıştırma yönü (radyal) şişme oranları TS 4084 esaslarına göre belirlenmiştir. Örnekler 103 ± 2 °C sıcaklıktaki kurutma fırını içerisinde değişmez ebatlara ve ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiş ve bu durumdaki kalınlıklar (L_0) $\pm 0,01$ mm hassasiyetinde belirlenmiştir. Daha sonra örnekler, 20 ± 2 °C sıcaklıktaki temiz su içerisine tamamen batırılarak kalınlık yönündeki boyutları değişmez hale gelene kadar bekletilmiştir. İlk ölçüm noktasından bu durumdaki kalınlıklar (L_R) tekrar ölçülmüş ve sıkıştırma (radyal) yönündeki maksimum şişme oranları (α_k) Eş. 4'e göre hesaplanmıştır [31].

$$\alpha_k = [(L_R - L_0) / L_0] \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

B3. HAVA KURUSU YOĞUNLUĞUN BELİRLENMESİ

Yoğunluklar TS 2472 esaslarına göre belirlenmiştir. Örnekler 20 ± 2 °C sıcaklık ve $\%65\pm 3$ bağıl nem şartlarındaki iklimlendirme kabininde değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar bekletilmiştir. Bu durumdaki örneklerin kütleleri (M_{12}) $\pm 0,01$ gr hassasiyetindeki analitik terazide tartılmış, boyutları (uzunluk, genişlik, kalınlık) ise kumpas ile $\pm 0,01$ mm hassasiyetinde ölçülerek hacimleri (V_{12}) belirlenmiştir. Hava kurusu yoğunluklar (δ_{12}) Eş. 5'e göre hesaplanmıştır [32].

$$\delta_{12} = M_{12} / V_{12} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (3)$$

B4. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

İstatistiksel değerlendirmelerde, MSTAT-C paket programı kullanılmıştır. İşlem grupları ile kontrol grupları arasında varyans analizleri (ANOVA) yapılmış ve elde edilen verilerde gruplar arası fark anlamlı çıktığında, Duncan testi sonuçları ile ortalama değerler arasındaki fark karşılaştırılmıştır. Böylece, denemeye alınan faktörlerin birbirleri arasındaki başarı sıralamaları, en küçük önemli fark (LSD) kritik değerine göre homojenlik gruplarına ayrılarak belirlenmiştir.

III. BULGULAR ve TARTIŞMA

A. SIKIŞTIRMA ORANI

Farklı koşullarda sıkıştırılarak yoğunlaştırılmış Doğu kayını örneklerinden elde edilen yoğunlaştırma sonrası hava kurusu rutubetteki sıkıştırma oranları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Sıkıştırma öncesi ve sonrası Doğu kayını örneklerinin ortalama kalınlıkları ve sıkıştırma oranı sonuçları

Yoğunlaştırma	Sıkıştırma öncesi kalınlık (mm)	Hedeflenen kalınlık (mm)	Sıkıştırma sonrası kalınlık (mm)	Sıkıştırma Oranı (%)
A1	25	20	21,67	13,34 (0,94)
A2	33,3	20	23,02	30,93 (0,91)
B1	25	20	22,33	10,67 (1,46)
B2	33,3	20	24,12	27,63 (1,23)

A1: 110 °C / %20

A2: 110 °C / %40

B1: 150 °C / %20

B2: 150 °C / %40

Parantez içerisindeki değerler standart sapmadır

Tablo 3'e göre, sıkıştırma oranı en yüksek A2 koşullarında yoğunlaştırılmış örneklerde ($\%30,93$), en düşük ise B1 koşullarında yoğunlaştırılmış örneklerde ($\%10,67$) elde edilmiştir. Yoğunlaştırma sonrası elde edilen sıkıştırma oranlarının, hedeflenen sıkıştırma oranlarından ($\%20$ ve $\%40$) farklı olduğu görülmüştür. Sıkıştırma oranlarının hedeflenenden daha düşük olması, sıkıştırma sürecinde ağaç

malzemenin hücre yapısında oluşan iç gerilmelerden ve rutubet kayıplarından kaynaklanabilir. Zira her iki faktörde malzemede bir miktar geri esnemeye neden olmuştur. Literatürde, ağaç malzemenin elastik davranışı nedeniyle hedeflenen sıkıştırma oranlarında farklılaşmaların (azalma) olduğu belirtilmiştir [6,29,33]. Bir başka çalışmada ise, sıkıştırılmış ağaç malzemenin elastik davranışından dolayı, uygulanan basıncın ortadan kaldırılmasından sonra sıkıştırılmadan önceki orijinal şeklini geri kazanma eğiliminin olduğu, bu davranışın spring-back (geri esneme) olarak tanımlandığı ve sıkıştırılmış haldeki ölçüde değişikliğe sebep olduğu bildirilmiştir [34].

B. GERİ ESNEME (SPRING-BACK) ORANI

Termo-mekanik yoğunlaştırılmış ve ısı işlem uygulanmış Doğu kayını örneklerinin geri esneme oranlarına ait varyans analizi sonuçları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Geri esneme oranlarına ait varyans analizi sonuçları

Faktör	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P≤0,05
Yoğunlaştırma (A)	3	2744,578	914,859	630,2056	0,0000*
Isıl işlem (B)	3	884,697	294,899	203,1426	0,0000*
Etkileşim (AB)	9	51,835	5,759	3,9674	0,0002*
Hata	144	209,043	1,452		
Toplam	159	3890,152			

*: 0,05’e göre anlamlı

Varyans analizi sonucuna göre, geri esneme oranı üzerinde yoğunlaştırma ve ısı işlem etkisi ile bunların karşılıklı etkileşimi anlamlı bulunmuştur (P≤0,05). Yoğunlaştırma ve ısı işlem düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Yoğunlaştırma ve ısı işlem düzeyinde geri esneme oranlarına ait Duncan testi karşılaştırmaları

Yoğunlaştırma	\bar{x} (%)	HG	
A1	6,517	D	LSD ± 0,5326
A2	12,080	B	
B1	9,109	C	
B2	17,651	A*	
Isıl işlem	\bar{x} (%)	HG	
Isıl işlemsiz	13,929	A*	LSD ± 0,5326
190 °C	12,902	B	
200 °C	10,737	C	
210 °C	7,789	D	

A1: 110 °C / %20

A2: 110 °C / %40

B1: 150 °C / %20

B2: 150 °C / %40

\bar{x} : Aritmetik ortalama

HG: Homojenlik gurubu

*: En yüksek geri esneme oranı

Tablo 5’e göre; yoğunlaştırma düzeyinde geri esneme oranı en yüksek B2 koşullarında yoğunlaştırılmış örneklerde (%17,651), en düşük ise A1 koşullarında yoğunlaştırılmış örneklerde (%6,517) elde edilmiştir. Sıkıştırma seviyeleri ile orantılı olarak daha yüksek sıkıştırma oranında (%40), geri esneme oranı daha fazla bulunmuştur. Bu durumun, sıkıştırmanın etkisi ile ağaç malzeme bünyesinde oluşan iç gerilmelerin %40 sıkıştırma oranında daha fazla gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde, yoğunlaştırma sürecinde boşluk hacminin azaltılması veya ortadan kaldırılması sonucunda malzeme bünyesinde oluşan gerilme miktarının hızlı bir şekilde artış gösterdiği bildirilmiştir [5,14,35,36]. Ayrıca, daha yüksek sıkıştırma oranında işlem gören ağaç malzemede daha fazla geri esnemenin olduğu ve bu durumun, malzeme bünyesinde daha fazla

gerilme meydana gelmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir [37]. Aynı sıkıştırma oranında (%20 veya %40) 150 °C’de yoğunlaştırılan örneklerde daha fazla geri esneme oranı elde edilmiştir. Bu durumun yoğunlaştırma sürecinden sonra, 110 °C’de yoğunlaştırılan örneklere göre daha düşük rutubet miktarına sahip 150 °C’de yoğunlaştırılan örneklerin, iklimlendirme (20±2 °C / 65±3% RH) aşamasında kalınlık artışının fazla olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Literatürde, termal olarak sıkıştırılmış ağaç malzemedeki geri esnemenin meydana geldiği bu durumun ise, ligninin doğal termoplastik yapısından ve ağaç malzemenin rutubet miktarının, sıkıştırma sürecinde sıcaklığın etkisi ile azalmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [10].

Isıl işlem düzeyinde geri esneme oranı en yüksek ısıl işlemsiz örneklerde (%13,929), en düşük ise 210 °C sıcaklıkta ısıl işlem uygulanmış örneklerde (%7,789) elde edilmiştir. Isıl işlem uygulaması ve ısıl işlem sıcaklığının artırılması ile birlikte geri esneme oranlarında kademeli olarak azalmalar olmuştur. Isıl işlem sonucu ağaç malzeme bileşenlerinde meydana gelebilecek kimyasal bozunmaların sonuçlar üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Literatürde, yoğunlaştırma sonrası uygulanan ısıl işlemin ağaç malzemenin geri esneme özelliğini ve higroskopisitesini önemli ölçüde düşürdüğü, hem daha yüksek ısıl işlem sıcaklığı hemde daha uzun işlem süresinin boyutsal stabilitede daha iyi sonuçlar verdiği bildirilmiştir [38]. Ayrıca, ağaç malzemedeki iç gerilmelerin ortadan kaldırılması ile yoğunlaştırılmış malzemedeki oluşacak geri esneme etkisinin önüne geçilebildiği, malzemedeki geri esnemenin elimine edilmesinde ise hücre çeperinin higroskopik bileşenlerinin özellikle hemiselülozun termal bozunmasının önemli rol oynadığı bildirilmiştir [39,12,40].

Yoğunlaştırma-ısıl işlem ikili etkileşimi düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Yoğunlaştırma-ısıl işlem ikili etkileşimi düzeyinde geri esneme oranlarına ait Duncan testi karşılaştırması

Yoğunlaştırma	Isıl işlem							
	Isıl işlemsiz		190 °C		200 °C		210 °C	
	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG
A1	8,330	H	7,710	HI	6,160	K	3,870	L
A2	15,110	D	14,430	DE	11,550	F	7,230	IJ
B1	11,665	F	10,090	G	8,480	H	6,200	JK
B2	20,610	A*	19,380	B	16,760	C	13,855	E

LSD: ± 1,065

A1: 110 °C / %20

A2: 110 °C / %40

B1: 150 °C / %20

B2: 150 °C / %40

\bar{x} : Aritmetik ortalama

HG: Homojenlik gurubu

*: En yüksek geri esneme oranı

Tablo 6’ya göre; geri esneme oranı en yüksek B2 koşullarında yoğunlaştırılmış ısıl işlemsiz örneklerde (%20,610), en düşük ise A1 koşullarında yoğunlaştırılmış 210 °C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş örneklerde (%3,870) elde edilmiştir.

C. SIKIŞTIRMA KALINLIĞINDAKİ GERİ DÖNÜŞ ORANI

Termo-mekanik yoğunlaştırılmış ve ısıl işlem uygulanmış Doğu kayını örneklerinin sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranlarına ait varyans analizi sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranlarına ait varyans analizi sonuçları

Faktör	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P≤0,05
Yoğunlaştırma (A)	3	4454,270	1484,757	214,0857	0,0000*
Isıl işlem (B)	3	151215,658	50405,219	7267,8840	0,0000*
Etkileşim (AB)	9	1107,012	123,001	17,7355	0,0000*
Hata	144	998,688	6,935		
Toplam	159	157775,628			

*: 0,05'e göre anlamlı

Varyans analizi sonucuna göre, sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranı üzerinde yoğunlaştırma ve ısıl işlem etkisi ile bunların karşılıklı etkileşimi anlamlı bulunmuştur (P≤0,05). Yoğunlaştırma ve ısıl işlem düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Yoğunlaştırma ve ısıl işlem düzeyinde sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranlarına ait Duncan testi karşılaştırmaları

Yoğunlaştırma	\bar{x} (%)	HG	
A1	44,30	B	LSD ± 1,164
A2	35,18	D	
B1	49,56	A*	
B2	40,32	C	
Isıl işlem	\bar{x} (%)	HG	
Isıl işlemsiz	93,48	A*	LSD ± 1,164
190 °C	38,80	B	
200 °C	21,64	C	
210 °C	15,44	D	

A1: 110 °C / %20

A2: 110 °C / %40

B1: 150 °C / %20

B2: 150 °C / %40

\bar{x} : Aritmetik ortalama

HG: Homojenlik gurubu

*: En yüksek geri dönüş oranı

Tablo 8'e göre; sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranı en yüksek B1 koşullarında yoğunlaştırılmış örneklerde (%49,56), en düşük ise A2 koşullarında yoğunlaştırılmış örneklerde (%35,18) elde edilmiştir. Sıkıştırma oranı düşük elde edilen örneklerde, sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranı daha fazla bulunmuştur. Bu durum, yüksek sıkıştırma oranında yoğunlaştırılan örneklerin hücre yapısında oluşan çökme ile kırılmaların daha fazla ve lümenlerin kısmen kapanmış olmasından kaynaklanabilir [6]. Ayrıca, yoğunlaştırma öncesindeki başlangıç ölçülerine geri dönme eğilimi gösteren sıkıştırılmış örneklerin, düşük sıkıştırma oranına sahip olanlarında bu sonuca daha kolay ulaşabilmesi ile açıklanabilir. Literatürde, yoğunlaştırmada hücre çeperinin kırılması veya bükülmesi ile çökmelerin başladığı, düşük sıkıştırma oranında oluşan deformasyonun doğrusal ve elastik özellikte olduğu, kırılma aşamasının üzerindeki sıkıştırma oranında ise deformasyonun daha fazla arttığı ve bu aşamada çöktürülmüş hücre çeperlerinin birbirleri ile yakın temas haline geçtiği belirtilmiştir [41]. Ayrıca, yoğunlaştırılmış ağaç malzemenin suya veya yüksek seviyede neme maruz kalması halinde, sıkıştırma esnasında malzeme yapısında oluşan iç gerilmelerin rahatlaması sonucu sıkıştırılmış kalınlığın geri dönüş (set-recovery) etkisinin oluştuğu belirtilmiştir [12].

Isıl işlem düzeyinde; sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranı en yüksek ısıl işlemsiz örneklerde (%93,48), en düşük ise 210 °C sıcaklıkta ısıl işlem uygulanmış örneklerde (%15,44) elde edilmiştir. Suda bekletme testi sonrası ısıl işlemsiz örneklerde sıkıştırma oranı neredeyse tamamen kaybedilmiştir. Isıl işlem uygulaması ve ısıl işlem sıcaklığının artırılması sonucu sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranlarında kademeli olarak azalmalar olmuştur. Bu durum, yoğunlaştırma

sürecinde ağaç malzemenin hücre yapısında meydana gelen iç gerilmelerin ısı ile rahatlattılması ve şekil-ölçü etkisinden sorumlu çapraz bağların ısı ile sonuçlu parçalanması ile açıklanabilir [6,30,37,42-44].

Yoğunlaştırma-ısı ile işlem ikili etkileşimi düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Yoğunlaştırma-ısı ile işlem ikili etkileşimi düzeyinde sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranlarına ait Duncan testi karşılaştırması

Yoğunlaştırma	Isıl işlem							
	Isıl işlemsiz		190 °C		200 °C		210 °C	
	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG
A1	101,11	A*	37,34	E	22,16	H	16,60	J
A2	80,91	C	32,71	F	16,39	JK	10,70	L
B1	102,62	A*	45,67	D	29,66	G	20,29	HI
B2	89,30	B	39,49	E	18,35	IJ	14,15	K
LSD: $\pm 2,328$								
A1: 110 °C / %20		A2: 110 °C / %40		B1: 150 °C / %20		B2: 150 °C / %40		
\bar{x} : Aritmetik ortalama		HG: Homojenlik gurubu			*: En yüksek geri dönüş oranı			

Tablo 9’a göre; sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranı en yüksek, aralarındaki fark önemsiz olmak üzere B1 koşullarında yoğunlaştırılmış ısı ile işlemsiz örnekler (%102,62) ile A1 koşullarında yoğunlaştırılmış ısı ile işlemsiz örneklerde (%101,11), en düşük ise A2 koşullarında yoğunlaştırılmış 210 °C sıcaklıkta ısı ile işlem görmüş örneklerde (%10,70) elde edilmiştir.

D. RADYAL SIKIŞTIRMA YÖNÜ ŞİŞME ORANI

Termo-mekanik yoğunlaştırılmış ve ısı ile işlem uygulanmış Doğu kayını örneklerinin sıkıştırma yönü (radyal) şişme oranlarına ait varyans analizi sonuçları Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Sıkıştırma yönü şişme oranlarına ait varyans analizi sonuçları

Faktör	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P \leq 0,05
Yoğunlaştırma (A)	4	6197,211	1549,303	1537,3049	0,0000*
Isıl işlem (B)	3	8706,556	2902,185	2879,7108	0,0000*
Etkileşim (AB)	12	3908,579	325,715	323,1925	0,0000*
Hata	180	181,405	1,008		
Toplam	199	18993,750			

*: 0,05’e göre anlamlı

Varyans analizi sonucuna göre, sıkıştırma yönü şişme oranı üzerinde yoğunlaştırma ve ısı ile işlem etkisi ile bunların karşılıklı etkileşimi anlamlı bulunmuştur (P \leq 0,05). Yoğunlaştırma ve ısı ile işlem düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11’e göre; yoğunlaştırma düzeyinde sıkıştırma yönü şişme oranı en yüksek A2 koşullarında yoğunlaştırılmış örneklerde (%18,991), en düşük ise yoğunlaştırılmamış örneklerde (%4,770) elde edilmiştir. Sıkıştırma seviyeleri ile orantılı olarak yüksek sıkıştırma oranında (%40), daha fazla şişme oranı elde edilmiştir. Bu durumun, ağaç malzemelerin sıkıştırılmadan önceki başlangıç ölçülerine geri dönme eğiliminde olmalarından kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 11. Yoğunlaştırma ve ısıtma düzeyinde sıkıştırma yönü şişme oranlarına ait Duncan testi karşılaştırmaları

Yoğunlaştırma	\bar{x} (%)	HG	
Yoğunlaştırılmamış	4,770	E	
A1	9,111	C	LSD
A2	18,991	A*	± 0.4430
B1	8,138	D	
B2	17,562	B	
Isıl işlem	\bar{x} (%)	HG	
Isıl işlemsiz	22,587	A*	LSD
190 °C	11,304	B	± 0.3962
200 °C	7,191	C	
210 °C	5,775	D	

A1: 110 °C / %20 A2: 110 °C / %40 B1: 150 °C / %20 B2: 150 °C / %40
 \bar{x} : Aritmetik ortalama HG: Homojenlik gurubu *: En yüksek şişme oranı

Ayrıca sonuçlar, yoğunlaştırma sonrasında elde edilen sıkıştırma oranları ile paralellik göstermiş, sıkıştırma oranının yüksek elde edildiği gruplarda şişme oranı daha fazla gerçekleşmiştir. Literatürdeki farklı çalışmalarda da, sıkıştırma oranının, örneklerin boyutsal stabilitesini önemli derecede etkilediği, daha yüksek sıkıştırma oranında örneklerin daha fazla şiştiği belirtilmiştir [14,38,45].

Isıl işlem düzeyinde sıkıştırma yönü şişme oranı en yüksek ısıtma işlemsiz örneklerde (%22,587), en düşük ise 210 °C sıcaklıkta ısıtma işlem uygulanmış örneklerde (%5,775) elde edilmiştir. Isıl işlem uygulaması ve işlem sıcaklığının artırılması sonucu şişme oranlarında kademeli olarak azalmalar olmuştur. Literatürde, ısıtma işlem uygulaması sonrasında ağaç malzemenin kimyasal ve fiziksel yapısında bazı kalıcı değişikliklerin meydana geldiği bu değişikliklerin temel nedeninin hemiselülozların termal bozunması olduğunu, bunun da ağaç malzemedeki suyu tutan hidroksil gruplarının azalmasına yol açtığı, dolayısı ile boyutsal stabilitenin iyileşmesine neden olduğu belirtilmiştir [27]. Ayrıca, ısıtma işlem uygulanmış ağaç malzemenin higroskopiklik özelliğinin düştüğü ve bu düşüşün malzemenin boyutsal kararlılığını arttırdığı belirtilmiş, uygulamanın etkisinin ise işlem zamanına ve işlem koşullarına (sıcaklık, rutubetin miktarı ve dağılımı, oksijenin varlığı, malzeme boyutları vb.) bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir [12].

Yoğunlaştırma-ısıtma ikili etkileşimi düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Yoğunlaştırma-ısıtma ikili etkileşimi düzeyinde sıkıştırma yönü şişme oranlarına ait Duncan testi karşılaştırması

Yoğunlaştırma	Isıl işlem							
	Isıl işlemsiz		190 °C		200 °C		210 °C	
	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG	\bar{x} (%)	HG
Yoğunlaştırılmamış	6,423	G	5,082	HIJ	4,272	J	3,302	K
A1	17,652	C	8,150	F	5,780	GH	4,861	IJ
A2	40,061	A*	18,062	C	10,283	E	7,556	F
B1	13,748	D	8,007	F	5,579	GHI	5,220	HI
B2	35,053	B	17,219	C	10,042	E	7,934	F

LSD: $\pm 0,8860$

A1: 110 °C / %20 A2: 110 °C / %40 B1: 150 °C / %20 B2: 150 °C / %40
 \bar{x} : Aritmetik ortalama HG: Homojenlik gurubu *: En yüksek şişme oranı

Tablo 12'ye göre; sıkıştırma yönü şişme oranı en yüksek A2 koşullarında yoğunlaştırılmış ısılsız örneklerde (%40,061), en düşük ise yoğunlaştırılmamış 210 °C sıcaklıkta ısılsız işlem görmüş örneklerde (%3,302) elde edilmiştir.

E. HAVA KURUSU YOĞUNLUK

Termo-mekanik yoğunlaştırılmış ve ısılsız işlem uygulanmış Doğu kayını örneklerinin hava kurusu yoğunluk değerlerine ait varyans analizi sonuçları Tablo 13'de verilmiştir.

Tablo 13. Hava kurusu yoğunluk değerlerine ait varyans analizi sonuçları

Faktör	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P≤0,05
Yoğunlaştırma (A)	4	1,295	0,324	460,6700	0,0000*
Isılsız işlem (B)	3	0,043	0,014	20,5364	0,0005*
Etkileşim (AB)	12	0,009	0,001	1,0758	0,3830**
Hata	180	0,127	0,001		
Toplam	199	1,474			

*: 0,05'e göre anlamlı **: anlamsız

Varyans analizi sonucuna göre, hava kurusu yoğunluk değerleri üzerinde yoğunlaştırma ve ısılsız işlem etkisi anlamlı, bunların karşılıklı etkileşimi ise anlamsız bulunmuştur (P≤0,05). Yoğunlaştırma ve ısılsız işlem düzeyinde yapılan Duncan testi karşılaştırma sonuçları Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 14. Yoğunlaştırma ve ısılsız işlem düzeyinde hava kurusu yoğunluk değerlerine ait Duncan testi karşılaştırmaları

Yoğunlaştırma	\bar{x} (g/cm ³)	HG	
Yoğunlaştırılmamış	0,657	E	
A1	0,753	C	LSD
A2	0,884	A*	± 0,0140
B1	0,729	D	
B2	0,837	B	
Isılsız işlem	\bar{x} (g/cm ³)	HG	
Isılsız işlemsiz	0,794	A*	
190 °C	0,774	B	LSD
200 °C	0,765	BC	± 0,0125
210 °C	0,754	C	

A1: 110 °C / %20

A2: 110 °C / %40

B1: 150 °C / %20

B2: 150 °C / %40

\bar{x} : Aritmetik ortalama

HG: Homojenlik gurubu

*: En yüksek yoğunluk değeri

Tablo 14'e göre; yoğunlaştırma düzeyinde hava kurusu yoğunluk değeri en yüksek A2 koşullarında yoğunlaştırılmış örneklerde (0,884 g/cm³), en düşük ise yoğunlaştırılmamış örneklerde (0,657 g/cm³) elde edilmiştir. Sonuçlar, yoğunlaştırma sonrasındaki sıkıştırma oranları ile paralellik göstermiş, sıkıştırma oranının yüksek elde edildiği gruplarda hava kurusu yoğunluk daha yüksek bulunmuştur. Yoğunluklarda meydana gelen bu artışlar, sıkıştırma işlemlerinden sonra ağaç malzemenin boşluk hacminin azalması ve birim hacim başına düşen hücre çeperi miktarının artması ile açıklanabilir. Değişik çalışmalarda da, sıkıştırma oranı artışı ile yoğunluğunda artış gösterdiği belirtilmiştir [4,45-47]. Ayrıca, ağaç malzemenin sıkıştırılması ile elde edilen yoğunluk artışının büyük ölçüde, ağaç türünün özelliklerine ve kullanılan yoğunlaştırma yöntemi ile sıkıştırma oranına bağlı olduğu ifade edilmiştir [48].

Isıl işlem düzeyinde hava kurusu yoğunluk değeri en yüksek ısıl işlemsiz örneklerde (0,794 g/cm³), en düşük ise 210 °C sıcaklıkta ısıl işlem uygulanmış örneklerde (0,754 g/cm³) elde edilmiştir. Isıl işlem uygulaması ve işlem sıcaklığının artırılması sonucu hava kurusu yoğunluk değerlerinde azalmalar olmuştur. Bu azalmalar, ısıl işlem uygulaması ile örneklerde meydana gelen kütle kayıpları ve denge rutubet miktarındaki düşüşle açıklanabilir. Literatürde, ısıl işleme bağlı olarak yoğunluk kayıplarının yaşanmasında kütle kaybının önemli rol oynadığı belirtilmiştir [19,24]. Ayrıca, ısıl işlemde sonra ağaç malzeme yoğunluğundaki azalmaların ana sebeplerinin; ısıl işlem süresince başta hemiselüloz olmak üzere odun bileşenlerinin buharlaşan uçucu ürünlere dönüşmesi, ekstraktif maddelerin buharlaşması ve ısıl işlem uygulaması ile odunun daha az higroskopik olması sonucu daha düşük denge rutubet miktarı olduğu belirtilmiştir [18].

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, Termo-Mekanik (TM) yöntemle yoğunlaştırıldıktan sonra TermoWood yöntemiyle ısıl işlem uygulanmış Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) odununun bazı fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Ağaç malzemenin doğal elastik yapısı ve higroskopik özelliğinden dolayı hedeflenen sıkıştırma oranlarında %46'ya kadar kayıplar olmuştur. %20 veya %40 sıkıştırma oranında, 110 °C'de yoğunlaştırılan Doğu kayını örneklerinde 150 °C'de yoğunlaştırılanlara göre daha yüksek sıkıştırma oranı ve yoğunluk artışı elde edilmiştir. Yoğunlaştırma işlemlerinden sonra sıkıştırma oranlarına bağlı olarak Doğu kayını örneklerinin yoğunluğu %11'den %35'e kadar artış gösterirken, ısıl işlem uygulamasından sonra yoğunlukta %5'e kadar küçük azalmalar meydana gelmiştir.

Yoğunlaştırılmış ancak ısıl işlemsiz örneklerde, suda bekletme testi sonrası sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranı %100'e yakın değerde bulunmuştur. Hatta %20 sıkıştırma oranında yoğunlaştırılan örneklerde bu oran %100'ün üzerinde elde edilmiştir. Isıl işlem sonrasında işlem sıcaklığı artışına bağlı olarak sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş oranı önemli derecede azalmış, ısıl işlemsiz örneklere göre %83 oranında iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca, yoğunlaştırılmış örneklere 210 °C'de uygulanan ısıl işlem sonrası geri esneme oranında %44, sıkıştırma yönündeki (radyal yön) şişmede ise %74 oranında iyileşme sağlanmıştır.

Termo-mekanik yoğunlaştırma ve ısıl işlemin kombine edilerek kullanılması ile Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) odununun fiziksel özelliklerinin geliştirilebileceği belirlenmiştir. Bu bağlamda elde edilen modifiye malzemenin özellikle duvar kaplamaları, zemin kaplamaları, çalışma tezgahları, bahçe mobilyaları gibi yerlerde kullanılması düşünülebilir. Ayrıca, yoğunlaştırılmış kayın odununun su ile temasının olabileceği yerlerde kullanılması düşünüldüğünde boyutsal stabiliteyi sağlamak için 210 °C'de ısıl işlem yapılması önerilebilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] R. M. Rowell, P. Konkol, *Treatments that enhance physical properties of wood*, **Gen. Tech. Rep.**, Rep. No: FPL-GTR-55, (1987).
- [2] Y. Örs, H. Keskin, *Ağaç Malzeme Teknolojisi*, Öz Baran Ofset Matbaacılık, (2008).
- [3] J. Blomberg, B. Person *J. Wood Sci.* **50** (2004) 307-314.
- [4] J. Blomberg, B. Person, A. Blomberg *Wood Sci. Technol.* **39** (2005) 339-350.
- [5] A. Kutnar, M. Sernek *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva* **82** (2007) 53-62.

- [6] H. Pelit, *Yoğunlaştırma ve ısıtma işleminin doğu kayını ve sarıçamın bazı teknolojik özellikleriyle üstyüzey işlemlerine etkisi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye, (2014).
- [7] F. A. Kamke *Maderas Ciencia y Technol.* **8(2)** (2006) 83-92.
- [8] A. Kutnar, F. A. Kamke, M. Sernek *Wood Sci. Technol.* **43** (2009) 57-68.
- [9] R. M. Seborg, M. A. Millett, A. J. Stamm, *Heat-stabilized compressed wood (Staypak)*, **F.P.L.**, Report No: 1580 (revised), (1956).
- [10] F. F. P. Kollmann, E. W. Kuenzi, A. J. Stamm *Springer-Verlag* **Vol. II** (1975) 139-149.
- [11] E. V. Kultikova, *Structure and properties relationships of densified wood*, Yüksek Lisans Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, (1999).
- [12] N. Morsing, *Densification of wood: The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain*, Doktora Tezi, Technical University of Denmark, Denmark, (2000).
- [13] J. Blomberg, B. Persson, U. Bexell *Holzforchung* **60** (2006) 322-331.
- [14] H. Pelit, A. Sönmez, M. Budakçı *BioRes.* **9(3)** (2014) 4552-4567.
- [15] P. Cooper, J. Wang, *Enhanced value of moderate grade wood through high temperature modification in oil*, **Value-to-wood Research Report**, Project UT1, (2005).
- [16] M. J. Boonstra, *A two-stage thermal modification of wood*, Doktora Tezi, Dissertation in Cosupervision Ghent University and Université Henry Poincaré, Nancy-Fransa, (2008).
- [17] D. Sandberg, P. Haller, P. Navi *Wood Mater. Sci. Eng.* **8(1)** (2013) 64-88.
- [18] S. Korkut, D. Kocaefe *Düzce Üni. Orm. Der.* **5(2)** (2009) 11-34.
- [19] S. Yıldız, *Isıl işlem uygulanan doğu kayını ve doğu ladini odunlarının fiziksel, mekanik, teknolojik ve kimyasal özellikleri*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon-Türkiye, (2002).
- [20] P. Bekhta, P. Niemz *Holzforchung* **57(5)** (2003) 539-546.
- [21] B. Esteves, M. A. Velez *Wood Sci. Technol.* **41(3)** (2007) 193-207.
- [22] D. Aydemir, G. Gündüz *Bartın Orm. Fak. Der.* **11(15)** (2009) 71-81.
- [23] H. Şahin Kol *J. Environ. Biol.* **31(6)** (2010) 1007-1011.
- [24] O. Perçin, *Isıl işlemin lamine ahşap malzemenin bazı teknolojik özelliklerine etkilerinin incelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye, (2012).
- [25] TS 2470, *Odunda fiziksel ve mekanik deneyler için numune alma metotları ve genel özellikler*, **T.S.E. Standardı**, Ankara, (1976).
- [26] TS 2471, *Odunda, fiziksel ve mekanik deneyler için rutubet miktarı tayini*, **T.S.E. Standardı**, Ankara, (1976).
- [27] Finnish Thermowood Association, *ThermoWood handbook*, **FIN-00171**, Helsinki, Finland, (2003).
- [28] P. Navi, F. Girardet *Holzforchung* **54(3)** (2000) 287-293.
- [29] C. R. Welzbacher, J. Wehsener, A. O. Rapp, P. Haller *Holz Roh Werkst* **66** (2008) 39-49.
- [30] M. K. Dubey, *Improvements in stability, durability and mechanical properties of radiata pine wood after heat-treatment in a vegetable oil*, Doktora Tezi, University of Canterbury, Christchurch-New Zealand, (2010).
- [31] TS 4084, *Odunda radyal teğet doğrultuda şişmenin tayini*, **T.S.E. Standardı**, Ankara, (1983).
- [32] TS 2472, *Odunda fiziksel ve mekanik deneyler için birim hacim ağırlığı tayini*, **T.S.E. Standardı**, Ankara, (1976).
- [33] L. Rautkari, K. Laine, N. Laflin, M. Hughes *J. Mater. Sci.* **46** (2011) 4780-4786.
- [34] M. L. Garcia-Romeu, J. Ciurana, I. Ferrer *J. Mater. Proces. Technol.* **191(1)** (2007) 174-177.
- [35] M. P. Wolcott, B. Kasal, F. A. Kamke, D. A. Dillard *Wood Fiber Sci.* **21(3)** (1989) 320-329.
- [36] J. A. Nairn *Wood Fiber Sci.* **38(4)** (2006) 576-591.
- [37] K. Laine, L. Rautkari, M. Hughes, A. Kutnar *Eur. J. Wood and Wood Prod.* **71(1)** (2013) 17-23.

- [38] J. Cai, T. Ding, L. Yang *Appl. Mech. Mater.* **Vol: 152-154** (2012) 112-116.
- [39] W. Dwianto, M. Inoue, M. Norimoto *J. Jpn. Wood Res. Soc.* **43(4)** (1997) 303-309.
- [40] F. Heger, M. Groux, F. Girardet, C. Welzbacher, A. O. Rapp, P. Navi, *Mechanical and durability performance of THM-densified wood*, **Final Workshop COST Action E22**, Lisboa, (2004).
- [41] S. A. Ahmed, T. Morén, O. Hagman, A. Cloutier, C.H. Fang, D. Elustondo *J. Mater. Sci.* **48(24)** (2013) 8571-8579.
- [42] P. Navi, F. Heger *MRS Bull* **29(5)** (2004) 332-336.
- [43] W. Dwianto, M. Norimoto, T. Morooka, F. Tanaka, M. Inoue, Y. Liu *Holz als Roh- und Werkstoff* **56(6)** (1998) 403-411.
- [44] M. Inoue, N. Sekino, T. Morooka, R. M. Rowell, M. Norimoto *J. Trop. For. Sci.* **20(4)** (2008) 273-281.
- [45] Ö. Ünsal, Z. Candan, Ü. Büyüksarı, S. Korkut, Y. S. Chang, H. Yeo *Mokchae Konghak* **39(2)** (2011) 1-8.
- [46] Ö. Ünsal, Z. Candan *Drying Technology* **26** (2008) 1165-1169.
- [47] M. L. Arruda, C. H. S. Del. Menezzi *Int. Wood Prod. J.* **4(4)** (2013) 217-224.
- [48] L. Rautkari, *Surface modification of solid wood using different techniques*, Doktora Tezi, Aalto University, Espoo-Finlandiya, (2012).