

Yoğunlaştırmanın ısı işlem görmüş kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) odunlarının bazı fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri üzerine etkisi

Abdullah Canıylmaz^{a,*}, Samim Yaşar^a

Özet: Çalışmada, 120, 160 ve 200°C'lerde kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) odunu örneklerine ısı işlem uygulanmış, devamında örnekler %25 ve %50 oranında preslenerek yoğunlaştırılmıştır. Isıl işlem görmüş örneklerin fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopik ve termal özellikleri araştırılmıştır. Isıl işlem görmüş ve yoğunlaştırılmış örneklerin fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. FTIR bulguları, örneklerin kristallik indeksinde ısı işleminden kaynaklanan dikkate değer bir değişimin oluşmadığını göstermiştir. Termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel termogravimetri (DTG) eğrilerindeki asıl bozunma safhasında ısı işlem uygulanmış örneklerde kontrol örneklerine göre daha düşük madde kaybı olduğu belirlenmiştir. TGA ve DTG bulguları itibarıyla ısı işlemde uygulanan sıcaklık derecesinin yükseltilmesine bağlı olarak örneklerde önemli düzeyde holoselüloz kaybı olduğu tespit edilmiştir. Termo-mekanik olarak yoğunlaştırılmış kızılçam örneklerinin suyla temas edebileceği ortamlarda kullanılması düşünüldüğü takdirde, yoğunlaştırmadan önce ısı işlem uygulanmasının önerilebileceği görülmüştür. Yine, odun materyalinin taşıyıcı uygulamalar ile dış mekan (dış cephe kaplaması, park ve bahçe mobilyaları, vb.) veya iç mekan (lambri, parke, sauna, mobilya elemanları, vb.) uygulamalarında, ayrıca kısmen yanmaya dayanıklı yapılarda yararlanılabilirliğini güçlendirmek için ısı işlem ve yoğunlaştırma modifikasyon yöntemlerinin birlikte kullanılmasının önerilebileceği anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kızılçam, Yoğunlaştırma, Isıl İşlem, Özellikler

Effect of densification of heat-treated brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood on some physical, mechanical and chemical properties

Abstract: In the present study, heat-treatment was applied to brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood samples at 120, 160 and 200°C, and then the samples were pressed in the ratio of 25% and 50% for densification. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopic and thermal properties of heat-treated samples were investigated. The physical and mechanical properties of the heat-treated and densified samples were evaluated. FTIR spectroscopic findings showed that there was no remarkable change in the crystallinity index of the samples due to heat-treatment. It was observed that the heat-treated samples had lower material loss than the control samples at the main decomposition phase in the thermogravimetric analysis (TGA) and differential thermogravimetry (DTG) curves. However, according to the TGA and DTG findings, it was determined that a significant level of holocellulose loss occurred in the samples with the increase of the temperature applied in the heat-treatment. In the results obtained, it has been seen that it can be recommended to apply heat treatment before densification, if the thermo-mechanically densified brutian pine samples are considered to be used in environments where they can come into contact with water. In addition, heat-treatment and densification methods can be recommended to be used together for increase the usability of wood materials in load-bearing applications and outdoor (siding, park and garden furniture, etc.) or indoor (paneling, parquet, sauna, furniture elements, etc.) applications, as well as partially fire-resistant structures.

Keywords: Brutian Pine, Densification, Heat Treatment, Properties

1. Giriş

Odun, insanlığın başlangıcından itibaren ısınma, barınma ve avlanma amaçlı kullanılmıştır. Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak tarih boyunca odunun yararlanma alanları çeşitlilik kazanmıştır (Bozkurt ve Erdin, 1997). Günümüzde ağaç malzeme gerek masif odun gerekse odundan elde edilen ürünler olarak insan hayatında önemli yere sahip birçok alanda kullanılmaktadır. Buna rağmen, günümüzde odunun kullanım alanlarını kısıtlayan veya kullanımı sırasında problemler yaratabilecek olumsuz özelliklerinin de bulunduğu görülmüştür. Odunun, strüktürel özelliğine bağlı

olarak rutubet alıp verebilme yeteneği, boyutsal sabitliğini kaybetmesi, biyolojik bozunmalara maruz kalması ve çeşitli zararlılar tarafından tahrip edilmesi gibi kullanım alanında problem yaratacak olumsuz durumları beraberinde getirmektedir (Mayes ve Oksanen, 2002; Karakaş, 2008).

Odunun negatif yanlarının minimize edilmesi vasıtasıyla olumlu özelliklerinin daha ileri düzeylere ulaştırılmasına yönelik araştırmalara literatürde rastlanmaktadır. Bu çalışmalar odun modifikasyon yöntemlerini kapsamaktadır. Odun modifikasyon yöntemlerinden birisi, termal modifikasyon yöntemleri arasında yer alan ısı işlem olarak karşımıza çıkmaktadır. Isıl işlemin göze çarpan en önemli

✉ ^a Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

@ ^{*} **Corresponding author** (İletişim yazarı): abdullahcaniylmaz@gmail.com

✓ **Received** (Geliş tarihi): 28.09.2022, **Accepted** (Kabul tarihi): 17.11.2022



Citation (Atf): Canıylmaz, A., Yaşar, S., 2022. Yoğunlaştırmanın ısı işlem görmüş kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) odunlarının bazı fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri üzerine etkisi. Turkish Journal of Forestry, 23(4): 320-327. DOI: [10.18182/tjf.1181308](https://doi.org/10.18182/tjf.1181308)

özelliği, uygulanması esnasında kimyasal maddelerden faydalanılmamasına bağlı olarak çevresel ortama yönelik bir tehdit oluşturmamasıdır (Mayes ve Oksanen, 2002; Hill, 2006; Korkut vd., 2008). Bu özelliği ısı işlem görmüş odun materyalinin günümüzde tüketiciler tarafından tercih edilmesini sağlamaktadır.

Endüstriyel anlamda ısı işlem uygulamalarına yönelik Finlandiya Teknik Araştırma Merkezi (VTT) tarafından dikkate değer çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Odunun ısıyla işleme tabi tutulması çeşitli şekillerde (Finlandiya-ThermoWood, Hollanda-Plato yöntemi, Almanya-Yağla ısı muamele, Fransa-Retification ve Le Bois Perdure) yapılabilmektedir. Bu yöntemler içerisinde Avrupa'da VTT tarafından geliştirilen ve ticari anlamda en çok itibar göreninin "ThermoWood" olduğu bilinmektedir (Aydemir ve Gündüz, 2009; Korkut, 2009; Güller, 2012).

Diğer bir termal modifikasyon yöntemi olarak bilinen yoğunlaştırma işlemi ağaç malzemenin kalitesini arttırmak, dış etmenlere karşı korumak ve kullanım alanlarını genişletmek amaçlı uygulanmaktadır. Termal yoğunlaştırma işleminde de herhangi bir kimyasal madde kullanılmaması ve çevreci bir uygulama olması en önemli avantajlarından. Yoğunlaştırma işlemi, genellikle düşük yoğunluklu ağaç türlerine uygulanarak boyutsal kararlılığı, higroskopisiteyi, dayanıklılığı ve mekanik özellikleri daha iyi hale getirmektedir (Wang vd., 2000; Welzbacher vd., 2008; Tosun ve Sofuoğlu, 2021).

Türkiye'deki en önemli aslı orman ağacı türleri arasında bulunan ve doğal yayılış gösteren beş çam türünden birisi olan kızılçam (*Pinus brutia* Ten.), yayılış alanı itibarıyla birinci, hacim bakımından da Anadolu karaçamının ardından ikinci sırada yer almaktadır (Anşin, 1994; Dutkuner ve Koparan, 2016). Özellikle Akdeniz ikliminin hakim olduğu alanlarda yayılış göstermektedir. Ege, Marmara ve Akdeniz Bölgelerinde kıyıya bakan yamaçlarda geniş ve genellikle saf meşcereler oluşturmaktadır. Karadeniz Bölgesinin Akdeniz iklimi özelliklerini sergileyen kısımlarında kümelenme şeklinde yayılmaktadır (Öktem, 1987). Kızılçam, kapladığı 5 255 544 hektarlık alanla Türkiye'de en geniş yayılış gösteren tür olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu alanın 3 460 940 hektarının iyi seviyede normal koru ve 1 794 604 hektarının bozuk koru halinde olduğu kayıtlarda yer almaktadır (OGM, 2021).

Kızılçam odunu öncelikle kereste üretiminde, yanı sıra inşaat, ambalaj, mobilya, döşeme, maden direği, tel direği, çit kazığı, ahşap travers ve bazı tarım aletlerinin imalatı sektöründe değerlendirilmektedir. Ayrıca kontrplak, lif levha, yongalevha ve selüloz sanayinde başlıca hammadde kaynağı olarak karşımıza çıkmakta, kabukları ise tanen üretiminde kullanılabilir (Erten ve Taşkın, 1985; Ucar vd., 2013; Özdemir ve Uçar, 2016).

Çalışmada, kızılçamdan elde edilen örnekler öncelikle ısı işlem tabi tutulmuş, devamında örnekler termal yoğunlaştırmaya maruz bırakılmıştır. Uygulamalar sonrasında, işlem görmüş örnekler kontrol örnekleriyle karşılaştırılmış, oluşan kimyasal ve termal özelliklerdeki değişimler ortaya konmuştur. Ayrıca, uygulanan modifikasyon işlemlerinin örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan kızılçama ait materyal Isparta Gökaslan Kereste Firmasından temin edilmiştir. Materyal TS 2470 (1976) ve TS 53 (1981)'de öngörülen hususlar doğrultusunda hazırlanmış ve hava kurusu hale getirilmek üzere uygun ortamda yaklaşık %12 rutubet derecesine kadar bekletilmiştir.

2.2. Yöntem

Üç farklı ısı işlem uygulaması için, içerisinde hava sirkülasyonu olmayan ve normal atmosferik basınç altındaki laboratuvar tipi bir etüvde hedef sıcaklıklar olan 120, 160 ve 200°C'lere ulaşıldıktan sonra sıcaklık derecesi her bir uygulamada 2 saat süreyle sabit tutulmuştur. Isıl işlem süresi 120°C'deki uygulama için 5, 160°C'deki uygulama için 7 ve 200°C'deki uygulama için 9 saat sürmüştür. Isıl işlem uygulamasını takiben örnekler %65±5 bağıl nem ve 20±2°C sıcaklık koşullarında değişmez tartıma gelene dek iklimlendirme odasında dinlendirilmiştir.

Isıl işleme uğratılmış örnekler açık sistemde termomekanik (TM) yöntemle uygulanan yoğunlaştırma işlemi, tabla ebatları 60×60 cm olan, basınç ve sıcaklık kontrolüne imkan veren hidrolik test presinde yapılmıştır. İşlem, iki farklı varyasyon oluşturularak %25 ve %50 sıkıştırma oranlarında, 120±5°C pres sıcaklığı ve 5 MPa pres basıncı altında 30 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Yoğunlaştırılan örnekler yine %65±5 bağıl nem ve 20±2°C sıcaklık koşullarına ayarlanmış iklimlendirme odasında sabit kütle oluşuncaya dek muhafaza edilmiştir.

2.2.1. Fiziksel deneyler

20x20x30 mm ebatlarında hazırlanan örneklere yoğunluk tayini, boyutsal değişim ve su alma deneyleri sırasıyla TS 2472 (1976), TS 4084 (1983) ve TS EN 317 (1999) standartlarında belirtilen esaslara göre gerçekleştirilmiştir.

2.2.2. Mekanik deneyler

20x20x300 mm boyutlarında hazırlanan örneklerin eğilme direncinin tespiti için TS 2474 (1976), elastikiyet modülünün tayini için ise TS 2478 (1976) standartlarında belirtilen hususlar dikkate alınmıştır. Liflere paralel basınç direnci denemeleri 20x20x30 mm³ boyutlarındaki örneklerle TS 2595 (1977)'ye göre yürütülmüştür.

2.2.3. Kimyasal analizler

Yongalanan örnekler hava kurusu hale getirildikten sonra Retsch SK1 değirmeni kullanılarak 40-100 mesh aralığında öğütülmüştür. Sonrasında örnekler moulinex değirmeniyle homojen odun unu haline getirilmiş ve kimyasal analizlerde kullanılmıştır.

2.2.3.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi analizi

Odun unu haline getirilmiş örneklerin 10 mg'ının tartılarak, 1000 mg KBr ile preslenmesi sonucu oluşturulmuş peletlerin spektrumları, oda sıcaklığında ve 4000-400 cm⁻¹

dalga sayısı aralığında Perkin Elmer BX FTIR spektrometre cihazında kaydedilmiştir.

2.2.3.2. TG/DTA (Termogravimetrik / diferansiyel termogravimetrik analiz)

5 mg odun unu haline getirilmiş örneklerin TG/DTA analizleri, Perkin Elmer SII Diamond termal analiz cihazı vasıtasıyla azot ortamında dakikada 10°C ısıtma hızında 25-900°C aralığında gerçekleştirilmiştir.

2.3. İstatistiksel değerlendirme

Çalışma verilerine öncelikle tek yönlü varyans analizi (ANOVA) yapılmış, istatistiksel açıdan farklılığın ortaya çıktığı durumlarda farklı grupların tespit edilebilmesi için Duncan testi uygulanmıştır.

3. Bulgular ve tartışma

Kontrol ve ısı işlem görmüş kızılçam örneklerinin fiziksel özelliklerine ait değerlerin aritmetik ortalamaları Çizelge 1'de verilmiştir.

Kontrol örneklerine göre örneklerin yoğunluk değerlerinde ısı işlem ve yoğunlaştırmadan kaynaklanan farklılaşmalar saptanmıştır. Örneklerin yoğunluk değerleri 0.49 g/cm³ ile 0.88 g/cm³ aralığında belirlenmiştir. Isıl işlem görmüş örneklerin yoğunluk değerlerinde ısı işlemsiz örneklerle göre sıcaklık derecesinin artışına bağlı olarak düşüş meydana gelmiştir. İşlemsiz kızılçam kontrol örneklerinin hava kuru su yoğunluk değeri 0.53 g/cm³ iken, 200°C'de ısı işlem görmüş kızılçam kontrol örneklerinin yoğunluk değeri

%7.55 azalışla 0.49 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Yoğunlaştırma işlemine tabi tutulan örneklerin yoğunluk değerlerinin başlangıç değerlerine göre sıkıştırma oranlarının artışına paralel olarak yükseldiği görülmüştür. Isıl işlemsiz kızılçamın yoğunlaştırılmış örneklerinde en yüksek yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Kızılçamın ısı işlemesiz %25 oranında sıkıştırılmış örneklerinin yoğunluk değerinin başlangıç değerine göre %25 artışla 0.66 g/cm³'e ve %50 oranında sıkıştırılmış örneklerin yoğunluk değerinin başlangıç değerine göre %66 artışla 0.88 g/cm³'e ulaştığı belirlenmiştir.

Kontrol gruplarıyla karşılaştırıldığında ısı işlem sıcaklığındaki artış neticesinde hacim oranlarında azalma tespit edilmiştir. Örneklerin boyutsal değerleri üzerinde yoğunlaştırmanın da etkili olduğu görülmüştür. Sıkıştırma oranlarındaki artışa bağlı olarak hacimsel oranların azaldığı gözlenmiştir. Hava kuru su halde en düşük boyutsal değerler %50 oranında sıkıştırılmış örneklerde tespit edilmiştir.

Isıl işlem uygulanmış örneklerin su alma oranı değerlerinin ısı işlemsiz örneklere göre sürekli azalış eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu durumun, ısı işlemin materyaldeki serbest hidroksil gruplarının (Fengel ve Wegener, 1984) azalmasına sebebiyet vermesinden kaynaklandığı söylenebilir (ITWA, 2003; Tjeerdsma ve Militz, 2005; Ateş vd., 2009; 2010; Aydemir vd., 2011; Yaşar vd., 2020). En düşük su alma oranı %24.04 ile 2 saat suda bekletilmiş 200°C'de ısı işlem görmüş kızılçam kontrol örneklerinde saptanmıştır. En yüksek oran ise %103.20 ile 24 saat suda bekletilmiş ısı işlemsiz %50 oranında sıkıştırılmış örneklerde tespit edilmiştir.

Kontrol ve ısı işlem görmüş kızılçam örneklerinin mekanik özellikleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Kızılçamın kontrol ve ısı işlem görmüş örneklerinin fiziksel özellikleri

Isıl işlem	Sıkıştırma oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)		Hacimsel değişim (hava kuru su) (cm ³)		Hacimsel değişim (2 saat) (cm ³)		Hacimsel değişim (24 saat) (cm ³)		Su alma (2 saat) (%)		Su alma (24 saat) (%)	
		Kızılçam	Kızılçam	Kızılçam	Kızılçam	Kızılçam	Kızılçam	Kızılçam	Kızılçam	Kızılçam	Kızılçam	Kızılçam	Kızılçam
		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
Isıl işlemsiz	Kontrol	0.53 (0.02) ¹ b ²	12.20 (0.07) h	13.04 (0.12) d, e	13.68 (0.10) g	35.96 (3.95) b	50.73 (2.32) c						
	25	0.66 (0.01) c	9.50 (0.21) e	11.99 (1.09) a	13.50 (0.18) e, f	68.04 (17.62) f	73.14 (2.80) e						
	50	0.88 (0.02) g	6.60 (0.19) a	12.49 (0.50) b	12.80 (0.45) a	95.14 (9.93) h	103.20 (6.71) h						
120°C	Kontrol	0.53 (0.02) a	12.16 (0.23) h	13.06 (0.16) d, e	13.69 (0.24) g	34.14 (4.90) b	48.48 (3.01) c						
	25	0.64 (0.02) d	9.24 (0.23) d	12.70 (0.24) b, c	13.26 (0.09) c	66.42 (6.93) f	72.29 (3.14) e						
	50	0.84 (0.06) f	7.62 (0.40) b	12.99 (0.43) d, e	13.42 (0.18) d, e	81.36 (10.73) g	89.44 (7.77) g						
160°C	Kontrol	0.52 (0.06) b	12.09 (0.21) h	12.99 (0.37) d, e	13.60 (0.38) f, g	28.16 (6.53) a	43.01 (4.61) b						
	25	0.60 (0.04) c	9.83 (0.35) f	13.04 (0.41) d, e	13.31 (0.29) c, d	61.87 (4.06) e	72.54 (3.66) e						
	50	0.70 (0.01) e	8.54 (0.34) c	13.14 (0.16) e	13.31 (0.14) c, d	77.49 (7.22) g	83.28 (6.53) f						
200°C	Kontrol	0.49 (0.03) b	11.92 (0.23) g	12.63 (0.26) b, c	13.07 (0.18) b	24.04 (3.96) a	41.28 (3.50) a, b						
	25	0.60 (0.02) d	9.94 (0.21) f	12.80 (0.31) c, d	13.04 (0.33) b	50.85 (4.35) d	59.43 (3.38) d						
	50	-	-	-	-	-	-						

1: Standart sapma, 2: Duncan testine göre her sütündeki homojen gruplar, \bar{x} : Ortalama

Çizelge 2. Kızılçamın kontrol ve ısıtılmış örneklerinin mekanik özellikleri

Isıl işlem	Sıkıştırma oranı (%)	Eğilme direnci MOR	Elastikiyet modülü MOE	Liflere paralel basınç direnci Basma (N/mm ²)
		(N/mm ²)	(N/mm ²)	
		Kızılçam	Kızılçam	Kızılçam
		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
Isıl İşlemsiz	Kontrol	90.58 (7.25) ¹ b ²	8898.73 (232) a	59.21 (8.08) b
	25	150.35 (26.78) d	13004.61 (2726) c	67.49 (2.10) c
	50	203.48 (34.04) e	17462.41 (2110) d	99.75 (9.67) f
120°C	Kontrol	121.37 (26.30) c	9289.38 (1799) a	67.72 (6.50) c
	25	149.16 (14.62) d	12266.63 (1007) b, c	74.46 (14.47) d
	50	202.17 (37.97) e	19036.89 (4285) e	101.51 (17.62) f
160°C	Kontrol	99.76 (9.12) b	8415.94 (334) a	74.22 (6.20) d
	25	120.96 (16.03) c	11382.34 (2528) b	73.70 (8.73) d
	50	156.70 (34.69) d	16616.95 (4610) d	84.80 (13.78) e
200°C	Kontrol	100.90 (21.86) b	8372.15 (1441) a	76.84 (13.46) d
	25	92.69 (25.08) b	9523.92 (2479) a	53.08 (7.88) a
	50	71.95 (30.03) a	12679.89 (2787) b, c	-

1: Standart sapma, 2: Duncan testine göre her sütündeki homojen gruplar, \bar{x} : Ortalama

Isıl işlem görmüş örneklerin eğilme direnci değerlerinde ısıtılmış örneklerle karşılaştırıldıklarında sıcaklık derecesinin artışına bağlı olarak düşüş tespit edilmiştir. Isıl işlemsiz %50 oranında sıkıştırılmış kızılçam örneklerinin ortalama eğilme direnci değeri 203.48 N/mm² iken, 200°C'de ısıtılmış ve %50 oranında sıkıştırılmış kızılçam örneklerinin ortalama eğilme direnci değeri %64.64 azalışla 71.95 N/mm² olarak belirlenmiştir. Söz konusu durumun, özellikle 200°C gibi yüksek sıcaklıkta uygulanan ısıtılmış sonrasında materyalin kimyasal bileşenlerinin yapısal bozunmaları ile gerçekleştiği söylenebilir (Bürüç vd., 2019; Yaşar vd., 2020). Odunun kimyasal bileşenlerini oluşturan hemiselüloz, selüloz, lignin ve ekstraktif maddeler ahşap malzemenin ısıyla işlem görmesi sırasında farklı sıcaklık derecelerinde farklı maddelere dönüşerek bozunmaya uğramaktadırlar (Aydemir ve Gündüz, 2009). Özellikle, polisakaritlerde kayıp işlem şartlarına bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte 180°C'yi aşan sıcaklık derecelerinde başlamaktadır (Poncsak vd., 2006). Odunun kimyasal bileşenleri arasında ısıya karşı en dayanıklı olan lignin olduğu belirtilmiştir. Ligninde kütle kaybı olabilmeye için sıcaklığın 200°C'yi aşması gerekmektedir (Boonstra, 2008; Korkut ve Kocaefe, 2009). Ekstraktif maddeler çoğunlukla uçucu bileşenlerden oluşmaları nedeniyle ısıtılmış sırasında ahşap malzemenin kolaylıkla uzaklaşmaktadır (Karakas, 2008; Aytin, 2013). Ayrıca, ısıtılmış işlemin kırılma artışına sebep olmasıyla materyalin mekanik özelliklerinde zayıflamaya neden olduğu belirtilmiştir (Yıldız, 2002; Bekhta ve Niemz, 2003; Esteves vd., 2007; Boonstra, 2008; Korkut vd., 2008; Perçin, 2012). En yüksek direnci değerleri genel olarak %50 oranında sıkıştırılmış örneklerde tespit edilmiştir. Isıl işlemsiz, 120°C ve 160°C sıcaklıklarda ısıtılmış uygulanmış örneklerde yoğunlaştırma oranlarıyla paralel bir şekilde eğilme direnci değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Yoğunlaştırma işleminin örneklerinin yoğunluk değerlerinde

artış sağladığı tespit edilmiştir. Keza, ahşap malzemenin yoğunlaştırılması neticesinde, boşluk hacmindeki azalmadan kaynaklı olarak yoğunluk değerinin yükseldiği ve bu nedenle de mekanik özelliklerde gelişme sağlandığı belirtilmiştir (Tabarsa ve Chui, 1997; Ülker vd., 2012; Pelit, 2014; Pelit vd., 2018; Budakçı, vd., 2022).

Kızılçam örneklerinin elastikiyet modülü değerleri üzerinde ısıtılmış işlemin etkisi olduğu anlaşılmıştır. Genel olarak ısıtılmış işleme uğratılmış örnekler ısıtılmış işlemsiz örneklerle karşılaştırıldıklarında elastikiyet modülü değerlerinde sıcaklık derecesinin artışına bağlı olarak düşüş meydana gelmiştir. En yüksek elastikiyet modülü değeri, ısıtılmış işlemsiz %50 oranında sıkıştırılmış kızılçam kontrol örneklerinde 17462.41 N/mm² olarak, en düşük elastikiyet modülü değeri ise 200°C'de ısıtılmış işlem görmüş kızılçamın kontrol örneklerinde 8372.15 N/mm² olarak belirlenmiştir. Bu durumun, özellikle 200°C'den itibaren materyalde gerçekleşen yapısal tahribatın, odunun kimyasal bileşenlerinin dönüşmesi veya bozunmasından dolayı ortaya çıktığı söylenebilir (Yıldız vd., 2006; Esteves ve Pereira 2009; Korkut ve Kocaefe 2009; Aydemir vd., 2011). Örneklerin elastikiyet modülü değerleri üzerinde yoğunlaştırmanın önemli etkisinin bulunduğu belirlenmiştir. En yüksek elastikiyet modülü değerleri %50 oranında sıkıştırılmış örneklerde tespit edilmiştir. Isıl işlemsiz ve ısıtılmış uygulanan tüm örneklerde yoğunlaştırma oranlarıyla aynı doğrultuda elastikiyet modülü değerlerinin yükseldiği görülmüştür.

Isıl işlem görmüş örneklere ait liflere paralel basınç direnci değerleri ısıtılmış işlemsiz örneklerle karşılaştırıldığı taktirde, genel olarak uygulanan sıcaklık derecesinin yükselmesine paralel doğrultuda işleme uğratılmış örneklerin değerlerinde artış meydana gelmiştir. Örneklerdeki bu durumun, ısıtılmış işlemin denge rutubet miktarını düşürmesinden dolayı ortaya çıktığı düşünülmektedir (Bozkurt ve Erdin, 1995; Blomberg, 2006; Örs ve Keskin, 2008; Sefil, 2010;

Kol, 2010; Sofuoğlu, 2022). Yoğunlaştırma oranlarının artışına bağlı olarak liflere paralel basınç direnci değerleri de yükselmiştir. Ahşap materyalde yoğunlaştırma oranı yükseldikçe direnç ve sertlik değerlerinin de yükseliş sergilediği literatürde yer almıştır (Bozkurt ve Erdin, 1995; Blomberg, 2006; Örs ve Keskin, 2008; Sefil, 2010; Kol, 2010; Sofuoğlu, 2022). Başlangıç değerine göre, en yüksek liflere paralel basınç direnci değerleri %50 oranında sıkıştırılmış ısı işlemsiz, 120 ve 160°C'de ısı işlem görmüş örneklerde tespit edilmiştir.

Örneklerdeki kristallik indeksinin hesaplanmasında FTIR spektroskopik metot kullanılmıştır (Şekil 1). 1427 ve 897 cm^{-1} 'de göz önüne çıkan bandlar CH_2 bükülmesi ve anomerik CH_2 deformasyonunun kaynaklanmaktadır (Kataoka ve Kondo, 1998). Selülozun kristallik indeksinin tespiti A_{1427}/A_{897} ve A_{1373}/A_{2921} oranlarından faydalanılarak gerçekleştirilmiştir (Hassan vd., 2000). Spektrumlardan elde edilen A_{1373}/A_{667} ve A_{1373}/A_{696} oranları selüloz 1'in selüloz 2'ye dönüşümünün ifadesi olarak ortaya çıkmaktadır (Hassan vd., 2000; Akerholm vd., 2004). 1370, 1335 ve 1315 cm^{-1} 'deki CH bükülmesinin birleşimini, 1373 cm^{-1} 'deki band

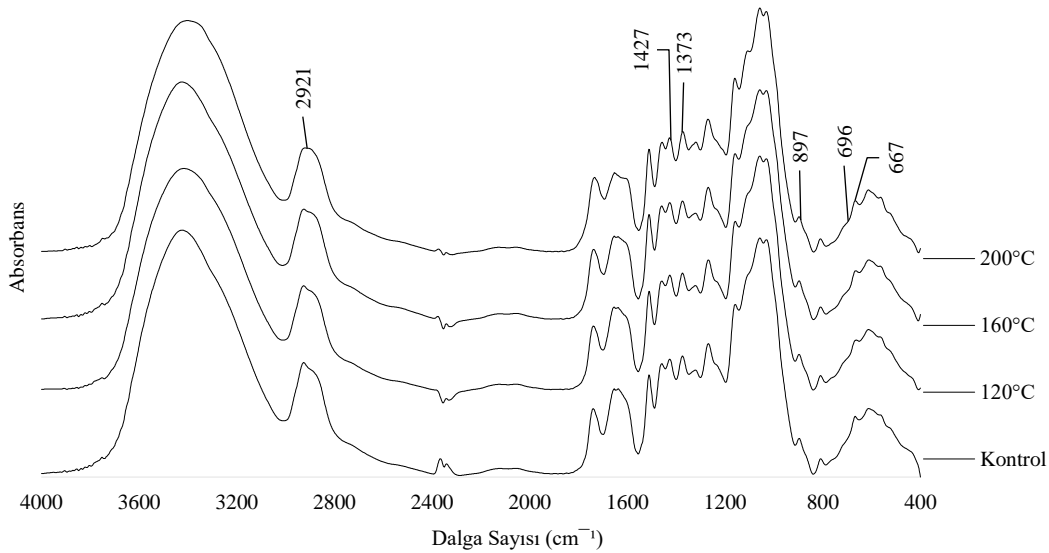
absorbans değeri göstermektedir. 667 cm^{-1} 'deki band ise düzlem dışı C-OH bükülmesini temsil etmektedir (Evans vd., 1995).

Elde edilen bulgular farklı sıcaklıklardaki ısı işlem uygulamalarının kızılçam örneklerinin kristallik indeksine belirgin bir etkide bulunmadığını göstermiştir. Bu durum literatürle uyumluluk göstermektedir (Yıldız ve Gümüşkaya, 2007; Ateş vd., 2009; 2010; Yaşar vd., 2020) (Çizelge 3).

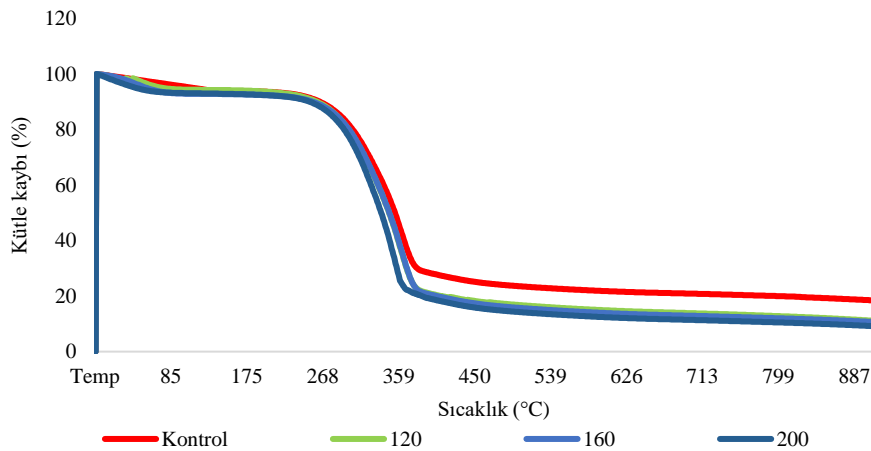
Kontrol ve ısı işleme uğratılmış kızılçam örneklerinin TGA ve DTG termogramları sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Isıl işlem görmüş ve görmemiş kızılçam örneklerinin kristallik indeksi

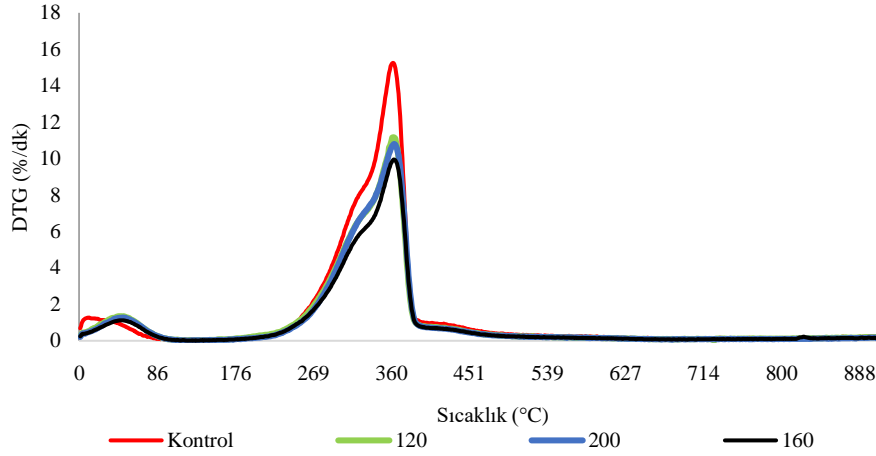
Kristallik indeksi	Kontrol	120°C	160°C	200°C
A_{1427}/A_{897}	3.24	2.91	2.80	3.10
A_{1373}/A_{2921}	1.06	1.12	1.07	1.15
A_{1373}/A_{667}	2.05	2.21	2.30	2.29
A_{1373}/A_{696}	3.23	3.18	3.61	3.72



Şekil 1. Kontrol ve ısı işlem görmüş kızılçam örneklerinin fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrumları



Şekil 2. Kontrol ve ısı işlem görmüş kızılçam örneklerinin termogravimetrik analiz (TGA) termogramları



Şekil 3. Kontrol ve ısıl işlem görmüş kızılçam örneklerinin diferansiyel termogravimetri (DTG) termogramları

Kızılçam örneklerinde 180°C'ye ulaşıldığında su ve bir kısım ekstraktif maddelerin (Thurner ve Mann, 1981) uzaklaştığı görülmüştür. Asıl bozunma, yani hemiselülozlar, ekstraktif maddelerin devamı, lignin ve selülozun termal bozunması (Thurner ve Mann, 1981; Meszaros vd., 2007), 180°C ile 635°C aralığında meydana gelmiştir. Maksimum bozunma ise 358°C'de gerçekleşmiştir.

TGA ve DTG sonuçlarında işlem görmemiş kızılçam örneklerine kıyasla ısıl işlem görmüş örneklerde ısıl işlem uygulamasının sıcaklık derecesinin yükseltilmesine paralel olarak asıl bozunma safhasında kızılçam için 180°C'den itibaren kütle kaybında giderek düşüş tespit edilmiştir. Bu durum, ısıl işlemin örneklerde hemiselüloz daha ötesinde selüloz oranında kayba sebebiyet verdiğini göstermektedir. Ayrıca, ısıl işleme uğratılmış örneklerin daha yüksek termal sabitlik ortaya koyduğu görülmektedir. TGA ve DTG sonuçları literatürle uyumluluk göstermektedir (Hill, 2006; Martinka vd., 2014; Zhang vd., 2019; Aydemir vd., 2019; Yaşar vd., 2020; Kaya, 2022).

4. Sonuç ve öneriler

Bu çalışmada, 120, 160 ve 200°C'lerde kızılçam odunu örneklerine ısıl işlem uygulanmış, devamında örnekler %25 ve %50 oranında preslenerek yoğunlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. FTIR bulguları, örneklerin kristallik indeksinde ısıl işlemde kaynaklanan dikkate değer bir değişimin olmadığını ortaya koymuştur. TGA ve DTG bulguları, işlem görmemiş kızılçam örneklerine göre, ısıl işlem görmüş örneklerde uygulama sıcaklığının artışına paralel olarak kütle kaybının giderek azaldığını göstermiştir. Bu durum, ısıl işlemin örneklerde hemiselüloz ve daha ötesinde selüloz oranında kayba neden olduğunu işaret etmiştir. Ayrıca, TGA ve DTG bulguları ısıl işlem görmüş örneklerin daha fazla termal dayanım sergilediğini ortaya çıkarmıştır. Elde edilen sonuçlarda, örneklerin boyutsal değişim ve su alma değerlerinin uygulanan ısıl işlem sıcaklık uygulama derecesinin yükselişine paralel olarak giderek azalış gösterdiği belirlenmiştir. Genel olarak, ısıl işlemin uygulanan sıcaklık derecelerinin artışına bağlı olarak örneklerin mekanik değerlerinde düşüş, buna karşın yoğunlaştırma oranındaki artışla söz konusu değerlerde yükseliş tespit edilmiştir. Yoğunlaştırılmış ahşap materyalin su ile temas etmesi durumunda sıkıştırma öncesi boyutlarına tekrar döndüğü bilinmektedir. Ancak, yoğunlaştırma öncesi

ısıl işlem uygulanmasıyla su alma oranında azalma ve boyutsal kararlılıkta gelişmelerin sağlanabileceği görülmüştür. Buna göre, termo-mekanik yöntemle yoğunlaştırılmış kızılçam örneklerinin suyla temas edebileceği ortamlarda kullanılması düşünüldüğü takdirde, yoğunlaştırmadan önce ısıl işlem uygulanmasının önerilebileceği anlaşılmıştır. Yine, çalışma türünün taşıyıcı uygulamalar ile dış mekan (dış cephe kaplaması, park ve bahçe mobilyaları, vb.) veya iç mekan (lambri, parke, sauna, mobilya elemanları, vb.) uygulamalarında, ayrıca kısmen yanmaya dayanıklı yapılarda kullanılabilirliğini arttırmak için ısıl işlem ve yoğunlaştırma modifikasyon yöntemlerinin birlikte kullanılmasının uygun olacağı görülmüştür.

Kaynaklar

- Akerholm, M., Hinterstoisser, B., Salmen, L., 2004. Characterization of the crystalline structure of cellulose using static and dynamic FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 339(3): 569-578.
- Anşin, R., 1994. Tohumlu Bitkiler I: Gymnospermae (Açık Tohumlular). Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, Trabzon.
- Ates, S., Akyıldız, M.H., Ozdemir, H., 2009. Effects of heat treatment on calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood. *BioResources*, 4(3): 1032-1043.
- Ateş, S., Akyıldız, M.H., Özdemir, H., Gümüşkaya, E., 2010. Technological and chemical properties of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) wood after heat treatment. *Romanian Biotechnological Letters*, 15(1): 4949-4958.
- Aydemir, D., Bürüç, G., Bakır, K., 2019. Doğu kayını ve saplı meşe odunlarının bazı özellikleri üzerine ısıl işlemin etkisi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 21(3): 713-721.
- Aydemir, D., Gündüz, G., 2009. Ahşabın fiziksel, kimyasal, mekaniksel ve biyolojik özellikleri üzerine ısıyla muamelelenin etkisi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 11(15): 71-81.
- Aydemir, D., Gündüz, G., Altuntaş, E., Ertuş, M., Şahin, H.T., Alma, M.H., 2011. Investigating changes in the chemical constituents and dimensional stability of heat-treated hornbeam and uludag fir wood. *BioResources*, 6(2): 1308-1321.
- Aytin, A., 2013. Yabani kiraz (*Cerasus Avium* (L.) Monench) odununun fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri üzerine yüksek sıcaklık uygulamasının etkisi. Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Bekhta, P., Niemz, P., 2003. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*, 57(5): 539-546.

- Blomberg, J., 2006. Mechanical and physical properties of semi-isostatically densified wood. PhD Dissertation, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Boonstra, M.J., 2008. Two stage thermal modification of wood. PhD Dissertation, Ghent University and Universite Henry Poincare, Ghent, Belgium, Nancy, France.
- Bozkurt, Y., Erdin, N., 1995. Yoğunluk ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiler. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 45(2): 11-34.
- Bozkurt, Y., Erdin, N., 1997. Ağaç Teknolojisi Ders Kitabı. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- Budakçı, M., Şenol, S., Korkmaz, M., 2022. Thermo-vibro-mechanic® (TVM) wood densification method: Mechanical properties. BioResources, 17(1): 1606-1626.
- Bürüç, G., Aydemir, D., Bakır, K., 2019. Doğu kayını ve Saplı meşe odunlarının bazı özellikleri üzerine ısı işlemin etkisi. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 21(3): 713-721.
- Dutkuner, İ., Koparan, İ., 2016. Kızılcım ve Karaçım kabuk miktarı ve kullanım olanakları. Electronic Journal of Vocational Colleges, 06(04): 692-703.
- Erten, P., Taşkın, O., 1985. Kızılcım (*Pinus brutia* Ten.) Kabuklarında Tanen Miktarının Saptanmasına İlişkin Araştırmalar. Ormanlık Araştırma Enstitüsü, Teknik Bülten Serisi No:147, Ankara.
- Esteves, B.M., Pereira, H., 2009. Wood modification by heat treatment: A review. BioResources, 4: 340-404.
- Esteves, B., Marques, A.V., Domingos, I., Pereira, H., 2007. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. Wood Science and Technology, 41(3): 193-207.
- Evans, R., Newman, R.H., Roick, U.C., Suckling, I.D., Wallis, A.F., 1995. Changes in cellulose crystallinity during kraft pulping. Comparison of infrared, X-ray diffraction and solid state NMR results. Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood, 49(6): 498-504.
- Fengel, D., Wegener, G., 1984. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, Germany.
- Güller, B., 2012. Effects of heat treatment on density, dimensional stability and color of *Pinus nigra* wood. African Journal of Biotechnology, 11(9): 2204-2209.
- Hassan, M.L., Rowell, R.M., Fadl, N.A., Yacoub, S.F., Christensen, A.W., 2000. Thermoplasticization of bagasse. I. Preparation and characterization of esterified bagasse fibers. Journal of Applied Polymer Science, 76(4): 561-574.
- Hill, C.A.S., 2006. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. Chichester, England.
- ITWA, 2003. ThermoWood Handbook. International ThermoWood Association Publisher, Helsinki.
- Karakaş, G., 2008. Ahlat (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) odununun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde ısı işlemin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Kataoka, Y., Kondo, T., 1998. FTIR microscopic analysis of changing cellulose crystalline structure during wood cell wall formation. Macromolecules, 31(3): 760-764.
- Kaya, A.I., 2022. Fire performance of thermally modified wood impregnated with clay nanomaterials. Fresenius Environmental Bulletin, 30(5): 5292-5296.
- Kol, H.Ş., 2010. Characteristics of heat-treated Turkish pine and fir wood after ThermoWood processing. Journal of Environmental Biology, 31(6): 1007-1011.
- Korkut, D.S., Korkut, S., Bekar, İ., Budakçı, M., Dilik, T., Çakıcıer, N., 2008. The effects of heat treatment on the physical properties and surface roughness of Turkish Hazel (*Corylus colurna* L.) wood. International Journal of Molecular Sciences, 9: 1772-1783.
- Korkut, S., 2009. Gürgen yapraklı kayacık (*Ostrya carpinifolia* scop.) odununun bazı mekanik özellikleri üzerine ısı işlem sıcaklık ve süresinin etkisi. Düzce Üniversitesi Ormanlık Dergisi, 5(1): 121-130.
- Korkut, S., Kocaefe, D., 2009. Isıl işlemin odun özellikleri üzerine etkisi. Düzce Üniversitesi Ormanlık Dergisi, 5(2): 11-34.
- Martinka, J., Hroncova, E., Chrebet, T., Balog, K., 2014. The influence of spruce wood heat treatment on its thermal stability and burning process. European Journal of Wood and Wood Products, 72(4): 477-486.
- Mayes, D., Oksanen, O., 2002. Thermowood Handbook. Joint Publication Finnforest, Finland.
- Meszaros, E., Jakab, E., Varhegyi, G., 2007. TG/MS, Py-GC/MS and THM-GC/MS study of the composition and thermal behavior of extractive components of *Robinia pseudoacacia*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 79(1-2): 61-70.
- OGM, 2021. Orman Atlası Online. Orman Genel Müdürlüğü, Bilgi Sistemleri Dairesi Başkanlığı, Coğrafi Bilgi Sistemleri Şube Müdürlüğü, Ankara, <https://www.orkoop.org.tr/link/atlas.pdf> Erişim: 01.09.2021.
- Öktem, E., 1987. Kızılcım El Kitabı Dizisi 2. Ormanlık Araştırma Enstitüsü Yayınları, Ankara.
- Örs, Y., Keskin, H., 2008. Ağaç Malzeme Teknolojisi. Gazi Kitabevi, Ankara.
- Özdemir, H., Uçar, M.B., 2016. Tannin which obtained from red pine tree bark evaluated as adhesive. Electronic Journal of Vocational Colleges, 6(4): 11-20.
- Pelit, H., 2014. Yoğunlaştırma ve ısı işlemin doğu kayını ve sarıçamın bazı teknolojik özellikleriyle üst yüzey işlemlerine etkisi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Pelit, H., Budakçı, M., Sönmez, A., 2018. Density and some mechanical properties of densified and heat post-treated Uludağ fir, linden and black poplar woods. European Journal of Wood and Wood Products, 76(1): 79-87.
- Perçin, O., 2012. Isıl işlemin lamine ahşap malzemenin bazı teknolojik özelliklerine etkilerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Poncsak, S., Kocaefe, D., Bouazara, M., Pichette, A., 2006. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). Wood Science and Technology, 40(8): 647-663.
- Sefil, Y., 2010. ThermoWood yöntemiyle ısı işlem uygulanmış göknar ve kayın odunlarının fiziksel ve mekanik özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Sofuoğlu, S.D., 2022. Ağaç malzeme thermo-mekanik yoğunlaştırmanın parlaklık ve sertliğe etkisi. Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi, 1(1): 15-19.
- Tabarsa, T., Chui, Y.H., 1997. Effects of hot-pressing on properties of white spruce. Forest Products Journal, 47(5): 71-76.
- Turner, F., Mann, U., 1981. Kinetic investigation of wood pyrolysis. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 20(3): 482-488.
- Tjeerdma, B.F., Militz, H., 2005. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. Holz als Roh- und Werkstoff, 63(2): 102-111.
- Tosun, M., Sofuoğlu, S.D., 2021. Ağaç malzemenin sıkıştırılarak yoğunlaştırılması konusunda yapılan çalışmalar. Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi, 4(1): 91-102.
- TS 2470, 1976. Odunda fiziksel ve mekanik deneyler için numune alma metodları ve genel özellikleri. TSE, Ankara.
- TS 2472, 1976. Odunda fiziksel ve mekanik deneyler için birim hacim ağırlığı tayini. TSE, Ankara.
- TS 2474, 1976. Odunun statik eğilme dayanımının tayini. TSE, Ankara.
- TS 2478, 1976. Odunun statik eğilmede elastikiyet modülünün tayini. TSE, Ankara.
- TS 2595, 1977. Odunun liflere paralel doğrultuda basınç dayanımı tayini. TSE, Ankara.
- TS 4084, 1983. Odunda radyal ve teğet doğrultuda şişmenin tayini. TSE, Ankara.
- TS 53, 1981. Odunun fiziksel özelliklerini tayin için numune alma, muayene ve deney metodları. TSE, Ankara.

- TS EN 317, 1999. Yonga levhalar ve lif levhalar - su içerisine daldırma işleminden sonra boyutsal tayini. TSE, Ankara.
- Ucar, M.B., Ucar, G., Pizzi, A., Gonultas, O., 2013. Characterization of *Pinus brutia* bark tannin by MALDI-TOF MS and ¹³C NMR. *Industrial Crops and Products*, 49: 697-704.
- Ulker, O., Imirzi, O., Burdurlu, E., 2012. The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) *BioResources*, 7(4): 5581-5592.
- Wang, J.M., Zhao, G.J., Lida, I., 2000. Effect of oxidation on heat fixation compressed wood of China fir. *Forestry Studies in China*, 2: 73-79.
- Welzbacher, C.R., Wehsener, J., Rapp, A.O., Haller, P., 2008. Thermo-mechanical densification combined with thermal modification of Norway spruce in industrial scale-dimensional stability and durability aspects. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 66: 39-49.
- Yaşar, S., Uz, A., Beram, A., 2020. Isıl işlem görmüş kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) yongalarından üretilen levhaların bazı özellikleri. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 4(1): 14-20.
- Yıldız, S., 2002. Isıl işlem uygulanan doğu kayını ve doğu ladini odunlarının fiziksel, mekanik, teknolojik ve kimyasal özellikleri. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yıldız, S., Gezer, E.D., Yıldız, U.C., 2006. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and Environment*, 41(12): 1762-1766.
- Yıldız, S., Gümüşkaya, E., 2007. The effects of thermal modification on crystalline structure of cellulose in soft and hardwood. *Building and Environment*, 42(1): 62-67.
- Zhang, N., Xu, M., Cai, L., 2019. Improvement of mechanical, humidity resistance and thermal properties of heat-treated rubber wood by impregnation of SiO₂ precursor. *Scientific Reports*, 9(1): 982.