



Investigation of Mechanical Behavior of Pre-Heat Treated Wooden Beams in Different Climate Conditions

Mehmet GÜNEŞ^{1,*} Mustafa ALTUNOK²

¹Cankiri Karatekin University, Technical and Business College, Department of Design, 18100, Merkez/CANKIRI

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Wood Product Industry Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 29.11.2021
Revision: 12.01.2022
Accepted: 18.04.2022

Highlights

- Wooden Beams.
- Heat Treatment.
- Climate Conditions.
- Mechanical Behavior

Keywords

Pre-Heat Treatment
Wood Modification
Oak Tannin
Modulus of Elasticity
Bending Strength

The degrading effect of the pre-heat treatment at low temperature with tannin modification was investigated. The applied pre-heat treatment takes place in 3 stages: drying at high temperature, actual heat treatment and cooling.

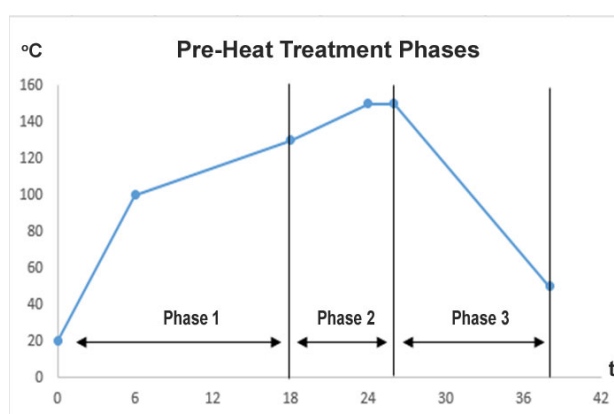


Figure A. Pre-heat treatment temperature-time graph

Purpose: In this study, the behavior of tannin-modified and pre-heat treated wooden beams in different climatic conditions were determined.

Theory and Methods: Samples prepared according to TS EN 386 standards from Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), oak (*Quercus petraea* L.) and chestnut (*Castanea sativa* Mill.) woods were impregnated with acorn tannin and pre-heated for 2 hours at 150°C and 160°C. After the samples were conditioned at 20°C temperature and 65% RH, 40°C temperature and 35% RH, 10°C temperature and 50% RH, bending strength tests according to TS 2474 and modulus of elasticity in bending according to TS 2478 were applied.

Results: As a result; At the level of wood species-process type interaction, the highest increase in bending strength was determined as 7.6% in tannin modified scotch pine samples at 150°C compared to the control samples. Decreases in bending strength and modulus of elasticity were determined from the mechanical properties of other wood species.

Conclusion: Accordingly, it can be suggested to use Scotch pine wood in the manufacture of lightly loaded wooden house columns and beams and other building elements.



Investigation of Mechanical Behavior of Pre-Heat Treated Wooden Beams in Different Climate Conditions

Mehmet GÜNEŞ^{1,*} Mustafa ALTUNOK²

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, 18100, Merkez/ÇANKIRI

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaçlıçleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

In this study, the behavior of tannin-modified and pre-heat treated wooden beams in different climatic conditions were determined. For this purpose; Samples prepared according to TS EN 386 standards from Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), oak (*Quercus petraea* L.) and chestnut (*Castanea sativa* Mill.) woods were impregnated with acorn tannin and pre-heated for 2 hours at 150°C and 160°C. After the samples were conditioned at 20°C temperature and 65% RH, 40°C temperature and 35% RH, 10°C temperature and 50% RH, bending strength tests according to TS 2474 and modulus of elasticity in bending according to TS 2478 were applied. As a result; At the level of wood species-process type interaction, the highest increase in bending strength was determined as 7.6% in tannin modified scotch pine samples at 150°C compared to the control samples. Accordingly, it can be suggested to use Scotch pine wood in the manufacture of lightly loaded wooden house columns and beams and other building elements.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29.11.2021
Düzelme: 12.01.2022
Kabul: 18.04.2022

Keywords

Pre-Heat Treatment
Wood Modification
Oak Tannin
Modulus of Elasticity
Bending Strength

Anahtar Kelimeler

Ön Isıl İşlem
Ağaç Modifikasyonu
Meşe Taneni
Elastikiyet Modülü
Eğilme Direnci

Ön Isıl İşlem Uygulanmış Ahşap Kirişlerin Farklı İklim Şartlarındaki Mekanik Davranışlarının İncelenmesi

Öz

Bu çalışmada, tanen ile modifiye edilip ön ısıtma işlemi uygulanmış ahşap taşıyıcı kirişlerin farklı iklim koşullarındaki davranışları belirlenmiştir. Bu maksatla; Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), meşe (*Quercus petraea* L.) ve kestane (*Castanea sativa* Mill.) odunlarından TS EN 386 standartlarına göre hazırlanan örnekler meşe palamodu taneni ile emprenye edilmiş, 150°C ve 160°C'de 2 saat süre ile ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Örnekler sırasıyla 20°C sıcaklık ve %65 bağıl nem, 40°C sıcaklık ve %35 bağıl nem, 10°C sıcaklık ve %50 bağıl nemde kondüsyonlandıktan sonra TS 2474'e göre eğilme direnci, TS 2478'e göre eğilmede elastikiyet modülü testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak; ağaç türü-işlem çeşidi etkileşimi düzeyinde kontrol örneklerine göre en yüksek eğilme direnci artışı 150°C'de tanen ile modifiye edilmiş sarıçam örneklerinde %7.6 tespit edilmiştir. Buna göre, hafif yüklü ahşap ev kolon ve kirişleri ile diğer yapı elemanlarının imalatında sarıçam odununun kullanılması önerilebilir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ağaç malzeme eski çağlardan bu yana insanların yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmeleri için kullandıkları doğal kaynaklardan bir tanesidir. İnsanlar ağaçlardan barınma ihtiyaçlarını karşılamak için ahşap evler imal ederek dış etkilerden kendilerini izole etmişlerdir. Ahşap kullanılarak yapılan evlerde zamanla böcekler, mantarlar, iklim şartları ile güneşin zararlı ışınları bir araya gelerek ahşabı bozunmaya uğratarak fiziksel ve mekanik dayanımlarını azaltmıştır.

Ağaç tarih boyunca insanlığın vazgeçilmez hammadde kaynağı olmuş; günümüzde de orman varlığının giderek azalması ve daha uzun zaman kullanımı ile daha etkin işlenmesini zorunlu hale getirmiştir [1]. Ağaç malzemenin yapılarda taşıyıcı olarak uygulanması 18. yy bitiminde başlamış ve mimari anlayışa özgürlük

kazandırmıştır. Ayrıca yeni teknik ve yeni tutkallarla ahşap malzeme birlikte kullanılarak “tutkallı lamine konstrüksiyonlar” gibi farklı ürünler elde edilmiştir [2].

Dış ortam şartlarında böcekler, mantarlar ve güneşten gelen UV ışınları gibi faktörler altında bulunan ağaç malzemeyi bu etkenlerden korumak, fiziksel ve mekanik dayanımını iyileştirmek önemlidir. Sıralanan bu etkilere karşı ağacı muhafaza etmek için günümüzde yaygın olarak kullanılan işlemlerden biriside emprenyedir [3]. Gelişen teknoloji ile ahşabı bu tür etkilerden korumak için emprenye tekniği kullanılarak bu tür bozunmaların önüne geçilmiştir. Günümüzde, ağacın çevreye duyarlı ve zararsız yöntemlerle modifiye edilmesiyle ilgili uygulamalar artmaya başlamış ve ısıl işlemlerde bu alanda uygulama yöntemlerinden biri olmuştur [4].

Ağaç işleri endüstrisinde “ThermoWood” adıyla bilinen ısıl işlemin uygulanışı diğer ülkelerde farklı isim ve yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler sıralanacak olursa, Finlandiya (ThermoWood) yöntemi ağaç malzemenin ısıtılmasında sıcak buharın kullanılmasını prensip alır. Plato yönteminin uygulanması Hollanda da sıcak havanın ve buharın beraber kullanıldığı, Fransa’da (Rectification) asal gaz kullanıldığı Almanya da ise (Oil Heat Treatment) sıcak yağ kullanılan yöntemidir [5]. Isıl işlem ile muamele gören ağaç malzeme dış ortam şartlarında bahçe mobilyası, cephe kaplaması, pencere, kapı, lambri, yer döşemesi, sauna, banyo gibi alanlarda kullanılabildiği gibi iç mekânda da kullanım alanı giderek genişlemektedir [6]. Isıl işlemin ağaç malzemenin higroskopisitesini azaltıp boyutsal stabilizasyonunu arttırarak malzemenin fiziksel özelliklerini iyileştirdiği anlaşılmıştır [7]. Fakat ısıl işlem uygulanan ağaç malzemede kütle kayıplarına bakıldığında işlem sıcaklığı ve uygulama süresinin artmasıyla kayıplarında arttığı görülmüştür [8].

150°C üstündeki ısıl işlem sıcaklıklarında boyutsal stabilizasyon ile biyolojik dayanım iyileşmekte, sıcaklığın artması ile mekanik özelliklerde düşüşler meydana gelip malzemenin kimyasal özellikleri değişmektedir. Olumsuz olarak görülen bu durum, ısıl işlem görmüş odunun bazı kullanım yerlerini sınırlandırmaktadır [9]. Thermowood yöntemi Termo-S ve Termo-D olarak bilinen 190°C ve 212°C sıcaklıklarda yapılmaktadır [10]. Bu sıcaklıklardan daha düşük derecelerde ısıl işlem yöntemi uygulanmakta fakat belirtilen sıcaklıklardaki istenilen mekanik ve fiziksel özellik değerlerine ulaşılması zorlaşmaktadır. Bu çalışmada ısıl işlem sıcaklıkları literatürdeki Thermowood değerlerinden daha düşük sıcaklıklarda yapıldığından ön ısıl işlem olarak adlandırılmıştır.

Düşük sıcaklıklarda modifiye edilen ağaç malzemenin mekanik özelliklerindeki kayıpların daha az olduğu tespit edilmiştir. 130°C, 165°C ve 200°C’de 2, 6, 10 saat ısıl işleme maruz bırakılan örneklerde mekanik özelliklerdeki en az düşüş 130°C sıcaklık 2 saat muamele edilmiş örneklerde bulunmuş ve ısıl işlemin zamanı arttıkça mekanik direncinde azaldığı tespit edilmiştir [11].

Kauçuk ağacına (*Hevea brasiliensis*) 140°C, 150°C, 160°C’de ve 1, 2 ve 3 saat süre ile sıcak buhar yöntemiyle ısıl işleme tabi tutulduktan sonra adsorpsiyon kabiliyeti ve mekanik özellikleri araştırılmış. Basınç direnci değerleri 140°C ve 3 saat süre ile işlem gören örneklerde daha yüksek çıkmıştır. Tüm sıcaklıklarda denge rutubet içeriğinin azaldığı görülmüştür [12]. Eğilme direnci, ısıl işlem başarısının en önemli belirleyicisi olarak ifade edildiği çalışmada kavak ağacından (*Populus alba* L.) hazırlanan örnekler 120, 150, 180 ve 210°C’lerde 2 ve 4 saat süreyle ısıl işleme tabi tutulmuştur. Odunun şişme ve büzülme özelliklerinde iyileşmeler olmuş ancak eğilme direnci ve elastikiyet modülünde azalmalar meydana gelmiştir. Mekanik özelliklerde en iyi ısıl işlem sonuçları 120°C’de 2 saat süreyle düşük sıcaklıklarda elde edilmiştir. Genel olarak, 150°C veya 4 saatin üzerinde ısıl işlem uygulamaları mekanik özelliklerde düşüşe neden olması sebebiyle önerilmemiştir [13].

Meşe palamodu taneni ile emprenye edilen doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) 20 x 20 x 30 mm liflere paralel basınç direnci ve 20 x 20 x 150 mm ölçülerinde eğilme direnci örnekleri 150°C, 170°C, 190°C ve 210°C’de 2 saat ısıl işleme tabi tutulmuştur. Eğilme direnci ve liflere paralel basınç direnci düşük sıcaklıklarda bir miktar yükselirken, yüksek sıcaklıklarda belirtilen dirençler düşmüştür [14]. Tanenli bileşiklerin karışımı ile emprenye edilen sarıçam odununa 190°C’de 4 saat ısıl işlem uygulandıktan sonra belirli periyotlarda dış ortam şartlarında bekletilmiştir. Tanen ile muamele edilen odun örneklerinin çürümeye neden olan organizmalara karşı etkili sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir [15].

Isıl işlemin sert lif levhaların mekanik özelliklerine etkisini araştırmak için levhalara 140°C ve 180°C’de farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmıştır. Sıcaklığın artmasıyla beraber mekanik özellik değerlerinde düşüş olduğu belirlenmiştir [16].

Beyaz meşe (*Quercus alba* L.) odunundan 20°C sıcaklık ve %65 bağıl nem ortam şartında elde edilen deney örneklerine 160°C, 180°C ve 200°C sıcaklıklarda 3, 6 ve 9 saat boyunca ısı işlem termal modifikasyon yapılmıştır. MOR değerleri sıcaklık değerleri arttıkça azalmaya başladığı görülmüştür. Kontrol örneklerinde MOR değeri 203,85 MPa iken en az düşüş 160°C de 3 saat işlem gören örneklerde 202,36 MPa, en fazla düşüş 200°C de 9 saat işlem gören örneklerde 169,28 MPa olarak bulunmuştur [17].

Kestane odunundan oluşturulan kaplamalar Polivinil Asetat esaslı PVAc-D4 tutkalı ile yapıştırılarak lamine edilmiştir. Tanenli ve tanensiz örnekler etüvde 103°C ±2 sıcaklık ve %65±5 bağıl neme (%12 denge rutubetine) getirildikten sonra 180°C ve 2 saat ısı işlem uygulanmıştır. Eğilme direnci en yüksek tanen-ısı işlemli örneklerde, en düşük değer ise tanensiz-ısı işlemli örneklerde elde edilmiştir. Basınç direnci kontrol numunelerinde 51,2 N/mm², tanen-işlemsiz örneklerde en yüksek 58,22 N/mm² ve tanen-işlemli örneklerde 55,12 N/mm² bulunmuştur [18].

Bu çalışmada, meşe palamudu taneni çözültüsü ile emprenye edildikten sonra ön ısı işlem uygulanmış ahşap taşıyıcı (kiriş) yapı elemanlarının, bazı mekanik özellikleri üzerine farklı iklim koşullarının etkisi araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Ağaç Malzeme (Wood Material)

Bu çalışmada, yapısal uygulamalardaki yaygın kullanımlarından dolayı sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), meşe (*Quercus petraea* L.) ve kestane (*Castanea sativa* Mill.) odunları kullanılmıştır. Hava kuru rutubete sahip (yaklaşık %12) keresteler Ankara-Siteler semtinden rasgele seçim yöntemi ile temin edilmiştir. Kerestelerin düzgün lifli, ardaksız, budaksız ve diri odundan olmasına özen gösterilmiştir.

2.2. Tanen Çözültüsü (Tannin Solution)

Meşe palamudu taneni, orman bölgelerinde fazlaca bulunan meşe ağacının bir meyvesi olan palamuttan ekstraksiyon yöntemi ile elde edilen, çevreci ve doğal bir malzemedir. Tanen Türkiye’de ve dünyada en yaygın olarak dericilik sektöründe kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan meşe palamudu taneni imalatçı firmadan toz halinde tedarik edilmiştir. Çözültü haline getirmek için 80°C ye kadar ısıtılan saf su içerisinde %10 oranında daldırma kabında çözüldürülerek hazırlanmıştır.

2.3. Deney Örneklerinin Hazırlanması (Preparation of Experimental Samples)

Deneylerde kullanılacak örnekler rastgele seçilen 1. sınıf ağaçlardan, çatlaksız, budaksız, ardaksız, düzgün lifli, yoğunluk ve renk farkı olmayan şekilde diri odun kısımlarından TS 2470 ve TS 53 standartlarına göre hazırlanmıştır [19, 20]. Deney örneklerinin boyutları 1/5 ölçekli olarak küçültülmüş ve 32 x 64 x 880 mm ölçülerinde hazırlanmıştır.

2.3.1. Hava kuru yoğunluk (Air Dry Density)

Hava kuru yoğunluk tayini TS 2472 standartlarında 20x20x30 mm ebatlarında örnekler hazırlanmıştır, örnekler 20±2°C sıcaklık ve % 65±5 bağıl nem iklim koşullarında değişmez ağırlığa gelene kadar bekletilmiştir. Örnek ağırlıkları 0,01g hassasiyetteki terazide tartılıp 0,01mm duyarlılıkta dijital kumpas ile boyutları ölçülmüştür. Yoğunluklarının hesaplanması için eşitlik 1 kullanılmıştır.

$$\delta_{12} = \frac{M_{12}}{V_{12}} g/cm^3 \quad (1)$$

M₁₂: Hava kuru ağırlık (g), V₁₂: Hava kuru hacim (cm³).

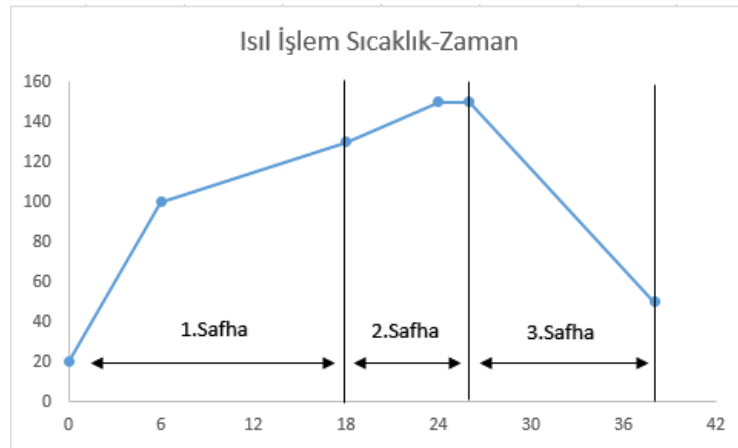
2.3.2. Emprenye (Impregnation)

Örnekler %10 doğal tanen çözültüsü içerisine tamamı çözültü içinde kalacak şekilde daldırılarak 24 saat bekletilmiştir. Bekletme sonrası daldırma kabından çıkarılan örnekler üzerindeki çözültü kalıntıları

temizlenerek ısı işlem uygulamak için hazır hale getirilmiştir. Emprenye sonrası örnekler hava sirkülasyonu sağlanan bir ortamda hava kurusu hale gelinceye kadar bekletilmiştir. Ağırlıkları 0,001g hassasiyette dijital terazide tartılarak retensiyon (tutunma) miktarları ve oranları belirlenmiştir.

2.3.3. Isıl İşlem (Heat Treatment)

Isıl işlemin ilk aşaması yüksek sıcaklıkta kurutmadır. Isıl işlem uygulanmadan önce ağaç malzeme içerisinde bulunan rutubetin ısı işleme bir etkisi olmadığından ısı işlem öncesi herhangi bir kondüsyonlama işlemi yapılmamıştır. Isıl işlem yeni kesilmiş ağaca ya da herhangi kuruluktaki bir ağaca uygulanabilir. Isıl işlem sürecinde en çok zaman alan safha kurutma sürecidir. Şekil 1’de görüldüğü gibi fırın içerisine 3 Atm basınçta kızgın buhar gönderilerek sıcaklık 6 saatte 100°C ye çıkarılmış, daha sonra sıcaklık 12 saatte 130°C ye çıkarılarak yüksek sıcaklıkta kurutma yapılmıştır. Bu sayede ahşabın barındırdığı rutubet %0 a kadar düşürülmüştür. Yüksek sıcaklıkta kurutma (1.safha) tamamlandıktan sonra fırın sıcaklığı sarıçam odununda (iğne yapraklı ağaç türlerinde) 150°C, meşe ve kestane odununda (yayvan yapraklı ağaç türlerinde) 160°C’ye 6 saatte çıkartılmıştır (2.safha). Bu sıcaklıklarda 2 saat bekletilerek soğutma safhasına (3.safha) geçilmiştir. Isıl işlemin son safhası olan soğutma kısmında fırın içerisindeki sıcaklık 12 saatte 50°C’ye düşürülmüştür.



Şekil 1. Isıl İşlem Safhaları

2.3.4. Laminasyon (Lamination)

150°C ve 160°C’de 2 saat süre ile ön ısı işlem uygulandıktan sonra 32 x 32 x 880 mm ölçülerindeki iki parça nem kürlenmeli DIN/EN 204 standartlarında D4 özellikli poliüretan tutkalı (PUR) ile pres altında radyal yönde yapıştırılarak 32 x 64 x 880 mm ölçülerinde TS 386’ya göre lamine edilmiştir [21].

2.3.5. Kondüsyonlama (Conditioning)

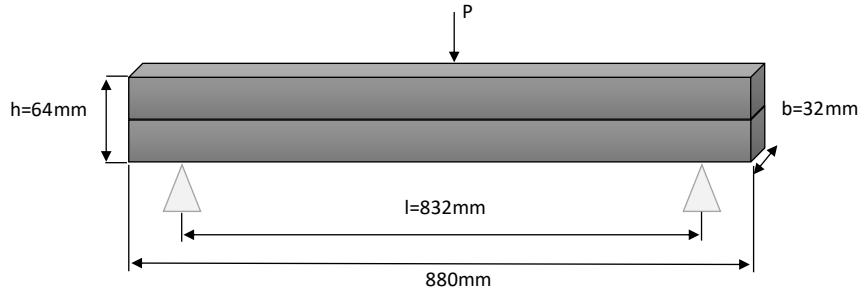
Lamine sonrası toplamda 270 adet deney örneği Tablo 1’de belirtilen değerlerden sırasıyla 20°C sıcaklık %65 bağıl nem, 40°C sıcaklık %35 bağıl nem ve 10°C sıcaklık %50 bağıl nem değerlerinde değişmez ağırlığa gelene kadar iklimlendirme cihazında kondüsyonlanmıştır.

Tablo 1. Deneylere ait örnek sayıları

Ağaç	İşlem	20°C-%65	40°C-%35	10°C-%50	Örnek sayısı
Sarıçam	İşlemsiz	10	10	10	30
Meşe	Ön ısı işlem	10	10	10	30
Kestane	Tanen + Ön ısı işlem	10	10	10	30
	Toplam				90+90+90
	Genel Toplam				270

2.4. Eğilme Direnci ve Eğilmede Elastikiyet Modülü (Bending Strength and Modulus of Elasticity in Bending)

Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Bölümü Ahşap Teknoloji Laboratuvarında yapılmıştır. Örnekler (Şekil 2) TS 2474'e göre eğilme direnci [22], TS 2478'e göre eğilmede elastikiyet modülü [23] esasları doğrultusunda üniversal test cihazına yerleştirilmiş ve testlerden elde edilen kuvvetler eşitlik 2-3'de yerlerine konularak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Eğilme direnci testi

$$\sigma_e = (3 \cdot P_{max} \cdot l) / (2 \cdot b \cdot h^2) \quad (2)$$

$$E_m = (\Delta F \cdot l^3) / (4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta f) \quad (3)$$

P_{max} : Kırılma anında uygulanan maksimum kuvvet (N),

P: Yüklemin alt ve üst limitlerinin aritmetik ortalamaları arasındaki farka eşit yük (N),

ΔF : Elastikiyet bölgesindeki kuvvet farkı (N),

l: Destek noktaları arasındaki açıklık (mm),

b: Deney numunesinin genişliği (mm),

h: Deney numunesinin yüksekliği (mm),

f: Net eğilme alanındaki sehim (mm).

2.5. İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis)

Modifikasyon işlemleri ve iklimlendirme şartlarının lamine ahşap malzemelerde eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla $p \leq 0,05$ önem düzeyinde çoklu varyans analizi yapılmıştır. Ağaç türü, işlem çeşidi ve iklim şartlarının test edilmiş özellikler üzerindeki etkisi anlamlı bulunduğu homojenlik gruplarını belirlemek için Duncan testi uygulanmıştır.

Konum servisleri birçok mobil uygulamanın önemli ve ayırt edici özelliklerinden biri olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Konum servislerinden alınan bilgilerin görselleştirilmesi için haritalar servisi kullanılmaktadır. Google, konum servisleri ile birlikte Android için uygulama geliştirene kullanıcıya bulunduğu yeri göstermek ya da aradığı bir konumu harita üzerinde göstermek için Google içinde yer alan Google Maps Android uygulama programlama arayüzünü sunmaktadır [16]. Bu uygulama programlama arayüzünü herhangi bir uygulamaya eklemek ve harita üzerinde istenilen işlemleri gerçekleştirebilmek için Google üzerinden bir uygulama programlama anahtarının elde edilmesi gerekir. Google, söz konusu anahtar uygulamaya özel oluşturup kullanıcıya sunmaktadır.

3. BULGULAR (FINDINGS)

3.1. Hava Kurusu Yoğunluğu (Air Dry Density)

Deney örneklerinin hava kurusu yoğunluk ortalamaları Tablo 2’de varyans analiz (ANOVA) değerleri ise Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 2. Hava kurusu yoğunluk ortalamaları (g/cm³)

Ağaç Türü	Örnek Sayısı	Toplam	Ortalama (X)	SS	min	max
Sarıçam	10	4.415	0.442	0.01	0.427	0.453
Meşe	10	8.353	0.835	0.01	0.846	0.821
Kestane	10	4.357	0.436	0.01	0.426	0.445
Toplam	30	17.125	0.571	0.19		

Tablo 3. Hava kurusu (ANOVA) varyans analizi

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	Önem Düzeyi p<0.05
Gruplar arası	2	1.049	0.525	6686.000	0.000
Grup içi	27	0.002	0.000		
Toplam	29	1.051			

Ahşap türlerinin hava kurusu yoğunluk değerleri p<0.05 önem düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Duncan test sonuçlarına göre; en yüksek hava kurusu yoğunluk değerleri sırasıyla meşe odununda (0.835 g/cm³), sarıçam odununda (0.442 g/cm³) ve kestane odununda (0.436 g/cm³) bulunmuştur.

3.2. Retensiyon Miktar ve Oranları (Retention Amount and Rates)

Rasgele yöntemle belirlenen hava kurusu halde bulunan bir kısım sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), meşe (*Quercus petraea* L.) ve kestane (*Castanea sativa* Mill.) örneği ısı işleminden önce %10’luk meşe palamudu tanen çözeltisine daldırılmış ve 24 saat bekletilerek emprenye edilmiştir. Örneklere tutunan doğal ahşap koruyucu tanen miktarları, oranları ve yoğunlukları tartı yöntemi ile belirlenerek Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Örneklere ait yoğunluk değerleri, retensiyon miktarı ve oranları

Ağaç Türü	Sarıçam	Meşe	Kestane
Hava Kurusu (gr/cm ³)	0.5219	0.6737	0.5167
Tanenli Hava Kurusu (gr/cm ³)	0.5303	0.6743	0.5217
Retensiyon Miktarı (gr)	1.8564	1.0910	1.2961
Retensiyon %	%2.62	%1.02	%1.63

Emprenyeli örneklerin işlemi sonrasında örneklere nüfus eden tanen maddesi tutunma miktarı eşitlik 4’te ve % retensiyon oranları eşitlik 5’e göre hesaplanmıştır.

$$R = [(G * C) / V] * 10 \quad (4)$$

$$R(\%) = [(Moes - Moeö) / Moeö] * 100 \quad (5)$$

G: T2 -T1,

T1: Emprenye öncesi örnek ağırlığı (g), T2: Emprenye sonrası örnek ağırlığı (g),

Moes: Emprenye sonrası tam kuru ağırlık (g), Moeö: Emprenye öncesi örnek tam kuru ağırlık (g),

V: Örnek hacmi (cm³), C: Çözelti konsantrasyonu (%).

3.3. Eğilme Direnci (Bending Strength)

Eğilme direnci değerleri ağaç türü (A), işlem çeşidi (B), ağaç türü – işlem çeşidi (AxB) ikili etkileşimi, işlem çeşidi – iklim şartı (BxC) ikili etkileşimi $p < 0.05$ önem düzeyinde anlamlı bulunmuştur (Tablo 5). Diğer faktörel kaynakların anlamsız olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5. Eğilme direncine ilişkin çoklu varyans analizi

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Önem ($p < 0,05$)
Ağaç Türü (A)	2	12977.804	6488.902	32.5610	0.0000
İşlem Çeşidi (B)	2	4087.657	2043.828	10.2558	0.0001
AxB	4	6915.529	1728.882	8.6754	0.0000
İklim (C)	2	1178.939	476.654	2.9579	0.0561
AxC	4	1807.327	451.832	2.2673	0.0666
BxC	4	2404.980	601.245	3.0170	0.0211
AxBxC	8	2312.942	289.118	1.4508	0.1839
Hata	108	21522.749	199.285		
Toplam		53207.927			

Ağaç türlerine ait homojenlik grupları Tablo 6’da, işlem çeşidine ait homojenlik grupları ise Tablo 7’de verilmiştir. Ağaç malzeme türleri arasında eğilme direnci değişimleri en yüksek (89.04 N/mm^2) meşe odununda, daha sonra sarıçam (80.75 N/mm^2) ve en düşük ise (65.37 N/mm^2) kestane odununda elde edilmiştir (Şekil 3). Meşe odununun eğilme direnci değerleri, sarıçam ve kestane türü odunlara göre daha yüksek çıkmıştır [24]. Isıl işlem sonrası işlem gören örneklerin eğilme dirençleri kontrol örneklerine göre daha düşük çıkmıştır [25]. Kontrol (işlemsiz) örneklerinin eğilme direnci esas alındığında ön ısıl işlemin, eğilme direncini %13 azalttığı, tanen + ön ısıl işlem uygulamasının ise eğilme direncini bir miktar artırıp (74.52 N/mm^2) ısıl işlemin bozundurucu etkisini azalttığı tespit edilmiştir (Şekil 4).

Tablo 6. Ağaç türüne ait homojenlik grupları

Ağaç Türü	X	HG
Sarıçam	80.75	B
Meşe	89.04	A
Kestane	65.37	C

LSD value = 5.886

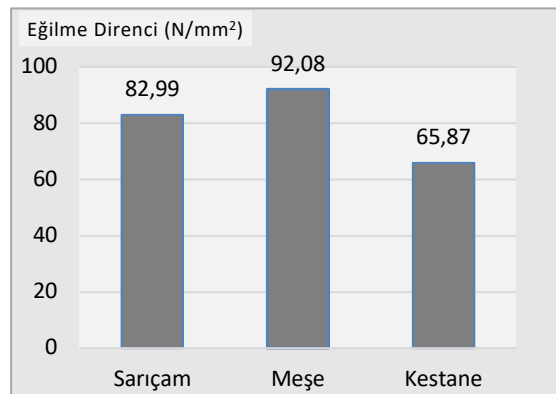
X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

Tablo 7. İşlem çeşidine ait homojenlik grupları

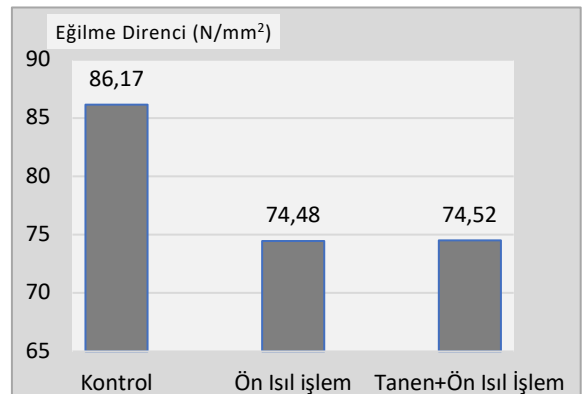
İşlem Çeşidi	X	HG
Kontrol	86.17	A
Ön ısıl işlem	74.48	B
Tanen+Ön ısıl işlem	74.52	B

LSD value = 5.886

X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

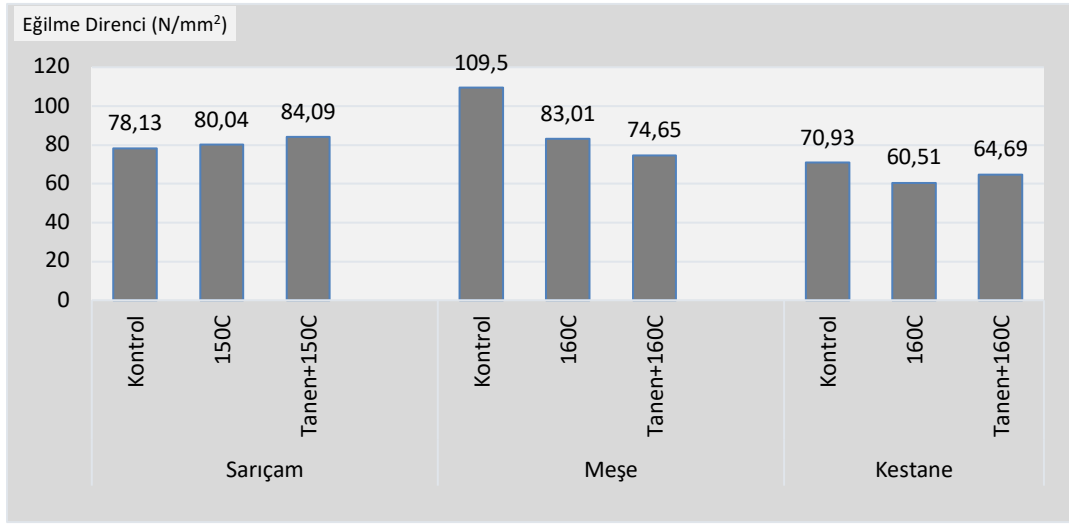


Şekil 3. Ağaç türlerine ait eğilme direnci



Şekil 4. İşlem çeşidine göre eğilme direnci

Ağaç türü+işlem çeşidine ait homojenlik grupları Tablo 8’de, işlem çeşidi+iklim şartına ait homojenlik grupları ise Tablo 9’da verilmiştir. Sarıçam kontrol örneklerine göre ön ısıtma işlem ve tanen empresyonu yapılan örneklerin eğilme dirençlerinin arttığı tespit edilmiştir. Kestane kontrol örneklerine göre ön ısıtma işlem gören örneklerin eğilme dirençlerinde düşüşlerin ardından tanen takviyesi yapılan örneklerde bir miktar artış görülmüştür. Geniş yapraklı ağaçlarda trahelerin tüllerle veya yabancı maddelerle tıkanmış olması odun içerisine sıvı maddelerin nüfus etmesine engel teşkil edebilir [26]. Meşe odununda tüllemeden dolayı tanen çözeltisinin serbest daldırma yöntemi ile çeperlere girememesinden, bu işlemin meşe için uygun olmadığı belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Ağaç türü ve işlem çeşidi ikili etkileşiminin eğilme direnci değişimine etkileri

Buradan; sarıçam ve kestane odunu için ön ısıtma işleminin ahşabın selüloz ve lignin bileşenlerindeki bozunumunu azalttığı ve geciktirdiği, bu nedenle de ahşabın mekanik özelliklerindeki kaybını azalttığı söylenebilir.

Tablo 8. Ahşap türü-işlem çeşidi homojenlik grupları

	İşlem	X	HG
Ahşap türü + İşlem Çeşidi	Sarıçam+Kontrol	78.13	BC
	Sarıçam+150°C Ön Isıl İşlem	80.04	BC
	Sarıçam+Tanen+150°C Ön Isıl İşlem	84.09	B
	Meşe+Kontrol	109.5	A
	Meşe+160°C Ön Isıl İşlem	83.01	B
	Meşe+Tanen+160°C Ön Isıl İşlem	74.65	BC
	Kestane+Kontrol	70.93	CD
	Kestane +160°C Ön Isıl İşlem	60.51	E
	Kestane +Tanen+160°C Ön Isıl İşlem	64.69	DE

LSD:10.20

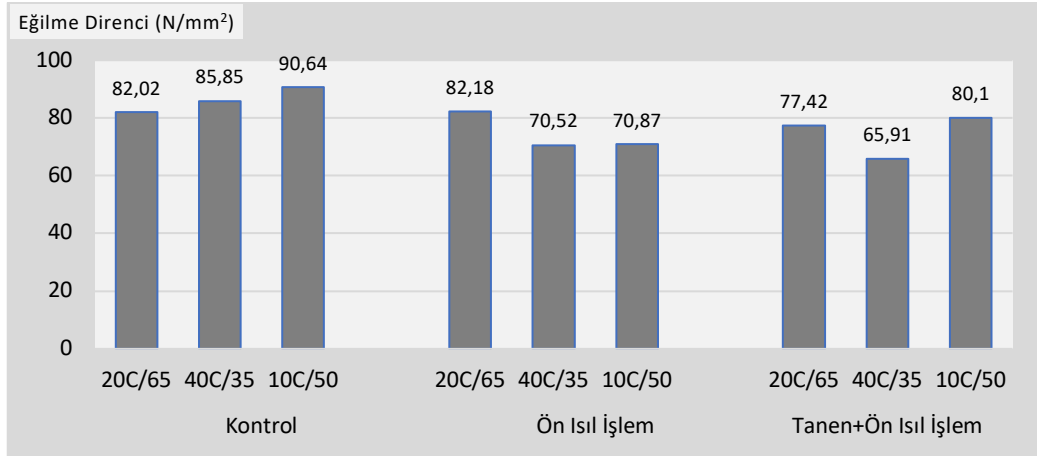
X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

Tablo 9. İşlem çeşidi-iklim şartı homojenlik grupları

	İşlem	X	HG
İşlem Çeşidi + İklim Şartı	Kontrol+20°C %65	82.02	AB
	Kontrol+40°C %35	85.85	AB
	Kontrol+10°C %50	90.64	A
	Ön Isıl İşlem +20°C %65	82.18	AB
	Ön Isıl İşlem +40°C %35	70.52	CD
	Ön Isıl İşlem +10°C %50	70.87	CD
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+20°C %65	77.42	BC
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+40°C %35	65.91	D
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+10°C %50	80.10	BC

LSD:10.20

En yüksek eğilme direnci 10°C sıcaklık %50 bağıl nemde kontrol örneklerinde (90.64 N/mm²), en düşük ise ön ısıtma işlemli 40°C sıcaklık %35 bağıl nemde bekletilen örneklerde (70,52 N/mm²) bulunmuştur (Şekil 6).



Şekil 6. İşlem çeşidi ve iklim şartı ikili etkileşiminin eğilme direnci değişimine etkileri

Kontrol örneklerine göre ön ısıl işlemin eğilme direncini azalttığı, fakat tanen takviyeli ön ısıl işlemlili 10°C sıcaklık %50 bağıl nemde iklimlendirilmiş örneklerin eğilme direncinde artışlara neden olduğu belirlenmiştir. Ağaç malzemenin mekanik özelliklerindeki artış ve azalışlar genellikle yıllık halka düzeni, lif yapısı, ağacın yoğunluğu gibi yapısal özelliklerinin yanı sıra malzemenin sıcaklığı ve nem içeriğinin karmaşık bir etkileşimine de bağlıdır [27-29]. Sıcaklık ve rutubet miktarının, ağaç malzeme mekanik özelliklerinin üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ağaç malzeme bünyesindeki lif doyumluğu rutubet miktarının ortalama %30'un altına düşmesi ve sıcaklığın azalmasıyla mekanik özelliklerde artış görülmektedir [30]. 10°C sıcaklık %50 bağıl nemde sıcaklığın düşmesiyle ahşap malzemede rijitleşmeden dolayı eğilme direncinin arttığı söylenebilir.

3.4. Elastikiyet Modülü (Modulus of Elasticity)

Elastikiyet modülü ahşap hakkında bilgilenmede en öne çıkan özelliklerden birisidir. Odunda rutubet miktarının ve sıcaklığının artışı ile değişen bir mekanik özelliktir. Özellikle sıcaklığın artması ile ters orantılı olarak elastiklik modülünün azaldığı bilinmektedir. Ağaç türü, ısıl işlem çeşidi ve iklim şartlarının eğilmede elastiklik modülüne yönelik çoklu varyans analizi sonuçları Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 10. Eğilmede elastikiyet modülüne ilişkin çoklu varyans analizi

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Önem (p<0,05)
Ağaç Türü (A)	2	364586508	182293254	169.7306	0.0000
İşlem Çeşidi (B)	2	74823169	37411584	34.8334	0.0000
AxB	4	4711127	1177781	1.0966	0.3620
İklim (C)	2	7333664	3666832	3.4141	0.0365
AxC	4	5660564	1415141	1.3176	0.2680
BxC	4	12579352	3144838	2.9281	0.0242
AxBxC	8	14723162	1840395	1.7136	0.1033
Hata	108	115993646	1074015		
Total	134	600411195			

Tablo 10'a göre ağaç türü (A), işlem çeşidi (B), iklim şartı (C) faktörleri ile işlem çeşidi x iklim şartı (BxC) ikili etkileşimi p<0.05 önem düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Diğer faktörel kaynakların anlamsız olduğu belirlenmiştir. Tablo 11, 12, 13 ve 14'te bu etkileşimlere ait homojenlik grupları verilmiştir.

Ağaç türüne göre eğilmede elastikiyet modülü en yüksek (11690 N/mm²) meşe odununda, en düşük değer (7874 N/mm²) kestane odununda elde edilmiştir (Şekil 7). İşlem çeşidine göre eğilmede elastikiyet modülü en yüksek tanen takviyeli ön ısıl işlem görmüş örneklerde (10070 N/mm²) bulunmuştur, en düşük ise işlemsiz örneklerde (8370 N/mm²) bulunmuştur (Şekil 8). İklim şartına göre elastikiyet modülü en yüksek (9735 N/mm²) 20°C sıcaklık ve %65 bağıl nemde, en düşük (9196 N/mm²) 10°C sıcaklık ve %50 bağıl

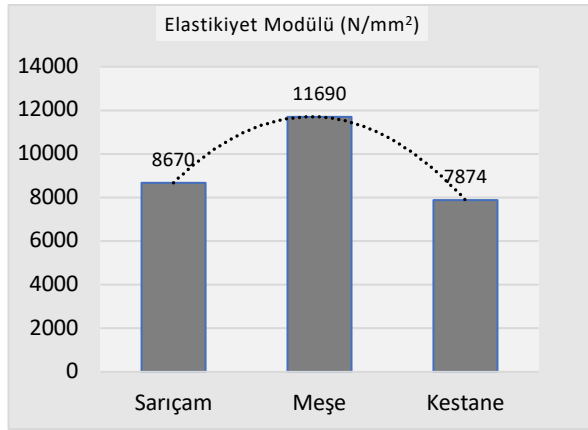
nemde iklimlendirilen örneklerde bulunmuştur. Elastikiyet modülü değerlerinin 10°C sıcaklık ve %50 bağıl nem şartlarında düşük çıkmasının, düşük sıcaklık ve düşük bağıl nemde odunun aşırı gevrekleşmesinden kaynaklandığı söylenebilir (Şekil 9). Isıl işlemlerle örneklerde sıcaklık ve bağıl nem değişimleriyle ahşabın temel kimyasal bileşiminde meydana gelen bozunumlar, elastikiyet modülünde bir azalmaya neden olmuş olabilir. Kontrol örneklerine göre tanen takviyeli ve ön ısıl işlemlerle örneklerde elastikiyet modülünün arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin, ısıl işlem uygulamasında tanen takviyeli odunun temel bileşenleri olan hemiselüloz, lignin ve selülozu desteklemesinden, bozunum derecesini azaltmış olabileceği söylenebilir.

Tablo 11. Ağaç türüne ait homojenlik grupları

Ağaç Türü	X	HG
Sarıçam	8670	B
Meşe	11690	A
Kestane	7874	C

LSD value = 432.1

X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

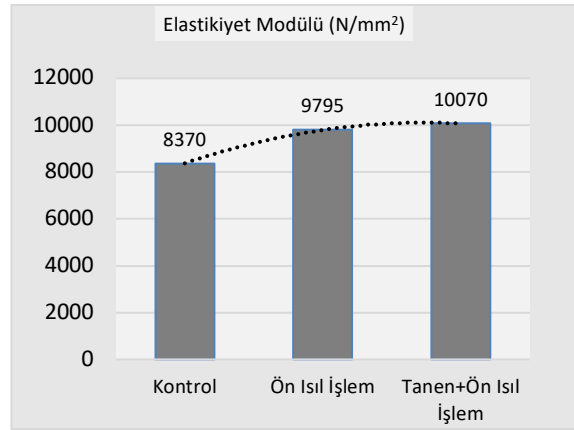


Şekil 7. Ağaç türüne göre elastikiyet modülü

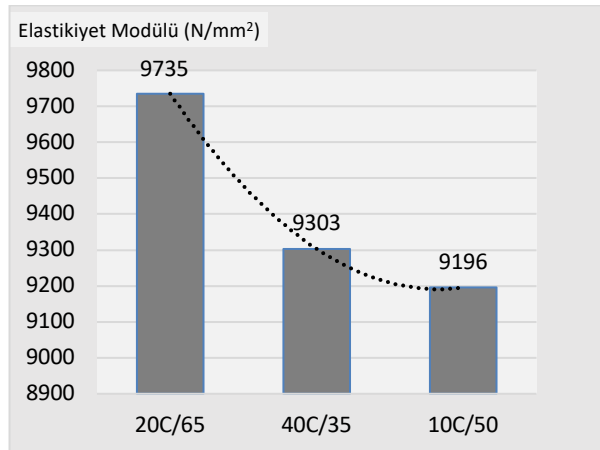
Tablo 12. İşlem çeşidine ait homojenlik grupları

İşlem Çeşidi	X	HG
Kontrol	8370	B
Ön ısıl işlem	9795	A
Tanen+Ön ısıl işlem	10070	A

LSD value = 432.1



Şekil 8. İşlem çeşidine göre elastikiyet modülü



Şekil 9. İklim şartına göre elastikiyet modülü değişimi

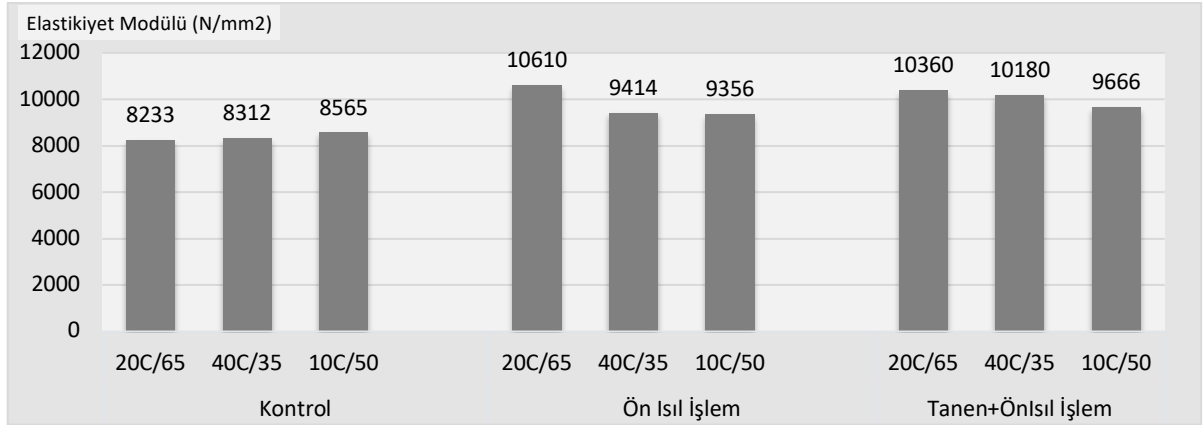
Tablo 13. İklim şartına ait homojenlik grupları

İklim Şartı	X	HG
20°C-%65	9735	A
40°C-%35	9303	B
10°C-%50	9196	B

LSD value = 432.1

X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

Şekil 10'da işlem çeşidi ve iklim şartı etkileşiminin elastikiyet modülü değişimi grafiği verilmiş olup bu verilere ait homojenlik grupları da Tablo 14'de gösterilmiştir. Eğilmede elastikiyet modülü değerleri en yüksek 20°C sıcaklık %65 bağıl nemde ön ısıl işlemlerle örneklerde (10610 N/mm²), en düşük ise 20°C sıcaklık %65 bağıl nemde kontrol örneklerinde (8233 N/mm²) bulunmuştur.



Şekil 10. İşlem çeşidi ve iklim şartı etkileşiminin elastikiyet modülü değişimi

Tablo 14. İşlem çeşidi ve iklim şartı homojenlik grupları

	İşlem	X	HG
İşlem Çeşidi + İklim Şartı	Kontrol+20°C %65	8233	D
	Kontrol+40°C %35	8312	D
	Kontrol+10°C %50	8565	D
	Ön Isıl İşlem +20°C %65	10610	A
	Ön Isıl İşlem +40°C %35	9414	C
	Ön Isıl İşlem +10°C %50	9356	C
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+20°C %65	10360	AB
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+40°C %35	10180	AB
	Tanen+ Ön Isıl İşlem+10°C %50	9666	BC

LSD:748.4 X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark

Kontrol grubunda 10°C sıcaklık %50 bağıl nemde iklimlendirilmiş örneklerin 20°C sıcaklık %65 bağıl nemde iklimlendirilmiş örneklere göre sıcaklık ve bağıl nemin azalması ile elastikiyet modülünde artışların olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık ve rutubet miktarının ağaç malzemenin mekanik özellikleri üzerinde etkisi olduğu bilinmekle beraber malzeme sıcaklığının düşüşü mekanik özelliklerden elastikiyet modülünde artışlara sebep olmuştur [30]. Isıl işlemlili ve tanen modifiyeli örneklerde bu durum tam tersi olarak tespit edilmiştir. Bunun sebebinin işlemlili örneklerin denge rutubet miktarlarının değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

Ağaç malzemeye sıcaklık ve kızgın buhar altında uygulanan ısı işlem sonucunda malzemenin içerisinde yeni kimyasal bileşikler oluşmaktadır. Bu işlem sonucunda fiziksel ve kimyasal yapıda meydana gelen değişimler ile bazı özelliklerine olumlu bazılarına da olumsuz olarak yansımaktadır. Isıl işlemde uygulanan sıcaklık derecesi ve ahşabın sıcaklığa maruz kalma süresinden dolayı odun ana bileşenleri lignin, selüloz ve hemiselülozun yapısının bozulup, odunun polimer yapısının değişmesiyle her üç tür ahşapta mekanik özelliklerde azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Tanen modifiyeli ön ısı işlem görmüş örneklerin eğilme dirençlerinde ön ısı işlemli örneklere göre bir miktar artış gözlenmiş, bu artış en çok sarıçamda odununda tespit edilmiştir. Meşe odunu örneklerine serbest daldırma yöntemi ile tanen çözeltisi daha az nüfuz edebildiği için, tanen takviyeli ve ön ısı işlemli meşe örneklerinde mekanik özelliklerde artış olmadığı söylenebilir. Düşük sıcaklık ve bağıl nemde (10°C sıcaklık ve %50 bağıl nem) iklimlendirilen örneklerin eğilme dirençlerinde literatüre paralel olarak artış meydana gelmiştir. Bu durumda, sarıçam ve kestane odunlarının tanen takviyeli ön ısı işlemli uygulamalar ile dış ortamda kullanımının uygun olacağı söylenebilir. Özellikle sarıçam hafif yüklü ahşap ev kolon ve kirişlerinde, diğer yapı elemanlarının imalatında da kullanılması önerilebilir. Sonraki çalışmalarda vakumlu emprenye yöntemi ile ağaç

malzemeye tanen çözeltisi daha çok nüfus ettirilerek düşük sıcaklıkta ısı işlem ile mekanik özelliklerindeki değişimler araştırılabilir.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 07/2019-24 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kurtoğlu A., Ağaç Malzeme Yüzey İşlemleri ve Genel Bilgiler, İstanbul Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, (2000) 31-32.
- [2] Beceren R., Mimaride Ahşap, Bursa Güney Marmara Mimarlık Dergisi, 35 (2000) 12-14.
- [3] Ayar S. (2008). Basınç ve Bekletme Süresinin Emprenye Maddelerinin Ağaç Malzemeye Nüfuzuna Etkisinin Belirlenmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [4] Bourgois J., Bartholin M., Guyonnet R., Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product, Wood Science and Technology, 23 (1989) 303-310.
- [5] Mayes D., Oksanen O., Thermowood Handbook, Finforest, (2002) 5-15.
- [6] Viitaniemi P., New properties for thermally-treated wood, Indust Horizons, (2000) 9-13.
- [7] Özçiğçi A., Altun S., Yapıcı F., Isıl İşlem Uygulamasının Ağaç Malzemenin Teknolojik Özelliklerine Etkisi, Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, (2009) 13-15.
- [8] Hillis W.E., High temperature and chemical effects on wood stability, Wood Science and Technology, 8 No. 4 (1984) 281-293.
- [9] Aydemir D., Gündüz G., Ahşabın Fiziksel, Kimyasal, Mekanik ve Biyolojik Özellikleri Üzerine Isıyla Muamelenin Etkisi, Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 11 No. 15 (2009) 61-70.
- [10] Jones D., Suttie E., Ala-Viikari J., Bergstrom N., Mayes D., The commercialisation of ThermoWood products, International Research Group on Wood Preservation, Doc. No. IRG/WP 06-40339, (2006).
- [11] Doruk Ş., Perçin O., Isıl İşlemin Bazı Ağaç Malzemelerin Eğilme ve Basınç Direncine Etkileri, Politeknik Dergisi, 13 No. 2 (2010) 143-150.
- [12] Patcharawijit A., Choodum N., Yamsaengsung R., Effects of superheated steam treatment on moisture adsorption and mechanical properties of pre-dried rubberwood, Drying Technology, 37 No. 13 (2018) 1647-1655.
- [13] Kaymakci A., Bayram B.Ç., Evaluation of Heat Treatment Parameters' Effect on Some Physical and Mechanical Properties of Poplar Wood with Multi-criteria Decision Making Techniques, BioResources, 16 No. 3 (2021) 4693-4703.
- [14] Perçin O., Altunok M., Doruk Ş., Saçlı C., Emprenye ve Isıl İşlemin Kayın Ağacının Bazı Mekanik Özelliklerine Etkisi, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 6 No. 3 (2017) 494-502.
- [15] Lopes D.J., Barnes H.M., Bobadilha G., Influence of Heat Treatment and Tannin Impregnation on Boron Depletion and Wood Durability, Forests, 11 No. 2 (2020) 201-213.
- [16] Voss K. Heat treatment of hardboards, Holz Roh-u, Werkstoff, (1952).

- [17] Xu J., Zhang Y., Shen Y., Li C., Wang Y., Ma Z., Sun W., New perspective on wood thermal modification: Relevance between the evolution of chemical structure and physical-mechanical properties, and online analysis of release of VOCs, *Polymers*, 11 No. 7 (2019) 1145-1164.
- [18] Gündüz G., Aydemir D., Onat S.M., Akgün K., The effects of tannin and thermal treatment on physical and mechanical properties of laminated chestnut wood composites. *BioResources*, 6 No. 2 (2011) 1543-1555.
- [19] TS 2470 (1976). Odunda Fiziksel Ve Mekaniksel Deneyler İçin Numune Alma Metotları ve Genel Özellikler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [20] TS 53 (1981). Odunun Fiziksel Özelliklerini Tayin İçin Numune Alma, Muayene ve Deney Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye .
- [21] TS EN 386 (2006). Tutkallanmış Lâmine Kereste- Performans Özellikleri ve Asgarî İmalât Şartları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [22] TS 2474 (1976). Odunun Statik Eğilme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [23] TS 2478 (1976). Odunun Statik Eğilmede Elastikiyet Modülünün Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [24] Keskin H., Dağlıoğlu N., Bazı odun türlerinde tanalit-e emprenye maddesinin eğilme direnci ve eğilmede elastiklik modülüne etkileri, *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 17 No. 1 (2016) 62-69.
- [25] Aydemir D., Bürüç G., Bakır K., Doğu Kayını ve Saplı Meşe Odunlarının Bazı Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkisi, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 21 No. 3 (2019) 713-721.
- [26] Bozkurt A.Y., Erdin N., (2011). Ağaç Teknolojisi, İstanbul Üniversitesi Basım ve Yayımevi, İstanbul, Türkiye.
- [27] Palka L., Predicting the effect of specific gravity, moisture content, temperature and strain rate on the elastic properties of softwoods, *Wood Science and Technology*, 7 No. 2 (1973) 127-141.
- [28] Hernández R.E., Passarini L., Koubaa A., Effects of temperature and moisture content on selected wood mechanical properties involved in the chipping process, *Wood Science and Technology*, 48 No. 6 (2014) 1281-1301.
- [29] Glass S., Zelinka S., Moisture relations and physical properties of wood, *General Technical Report FPL-GTR-282*, Chapter 4 (2021) 1-19.
- [30] Gerhards C.C., Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber Science*, 14 No. 1 (1982) 4-36.