

Kriyojenik sıcaklığın karaçam (*Pinus nigra*) odununun eğilme davranışına etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of cryogenic temperature on the bending behavior of Crimean pine (*Pinus nigra*) wood

Didem Verep Koç¹ 
Anıl İmak¹ 

¹ Bingöl Üniversitesi, Bingöl

Sorumlu yazar (Corresponding author)

Didem Verep Koç
dverep@bingol.edu.tr

Geliş tarihi (Received)

09.11.2025

Kabul Tarihi (Accepted)

20.05.2026

Sorumlu editör (Corresponding editor)

Deniz Aydemir
denizaydemir@bartin.edu.tr

Atıf (To cite this article): Verep Koç, D., & İmak, A. (t.y.). Kriyojenik sıcaklığın karaçam (*Pinus nigra*) odununun eğilme davranışına etkisinin incelenmesi. Ormancılık Araştırma Dergisi, 13(1), 102-108.
DOI: <https://doi.org/10.17568/ogmoad.1819955>



Creative Commons Atıf -
Türetilemez 4.0 Uluslararası
Lisansı ile lisanslanmıştır.

Öz

Bu çalışmada karaçam (*Pinus nigra*) odununun kriyojenik sıcaklıklarda eğilme davranışındaki değişimi incelenmiştir. Odun numuneleri kriyojenik olarak 10 dakika süreyle -196°C 'de sıvı azot içinde bekletilmiş ve numuneler oda sıcaklığında ($+22^{\circ}\text{C}$) test edilmiştir. ASTM D4761-19 standardına göre gerçekleştirilen üç nokta eğilme testleri sonucu oda sıcaklığında maksimum kuvvet 1564,38 N olarak ölçülürken kriyojenik numunede 2073,02 N değerine ulaşılmış ve eğilme mukavemetinin yaklaşık %32 arttığı gözlemlenmiştir. Kriyojenik işlem görmüş numunelerde daha gevrek bir kırılma davranışı ve daha az uzama tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karaçam, *Pinus nigra*, kriyojenik sıcaklık, sıvı azot, eğilme direnci, mekanik özellikler

Abstract

In this study, the change in the bending behavior of Crimean pine (*Pinus nigra*) wood at cryogenic temperatures was investigated. The wood samples were cryogenically treated by immersion in liquid nitrogen at -196°C for 10 minutes, and the tests were conducted at room temperature ($+22^{\circ}\text{C}$). According to the ASTM D4761-19 standard, three-point bending tests were performed. The maximum force at room temperature was measured as 1564.38 N, while the cryogenically treated samples reached 2073.02 N, indicating an approximate 32% increase in bending strength. The cryogenically treated samples also exhibited a more brittle fracture behavior and lower elongation.

Keywords: Crimean pine, *Pinus nigra*, cryogenic temperature, liquid nitrogen, bending strength, mechanical properties

1. Giriş

Odunun insanlık tarihi boyunca araç- gereç yapımında, ulaşımda, enerji üretiminde, barınmada ve birçok alanda temel hammadde olarak yaygın kullanımı bilinmektedir. İnsanoğlunun hayatını idame ettirmesi ve ihtiyaçlarını karşılamak için kullandığı odun materyalinin popülerliğini, 20. yüzyılda gelişen teknoloji ile alternatif maddeler elinden almıştır (Bowyer ve ark., 2007). Teknolojik gelişmeler ışığında oduna alternatif olarak kullanılabilecek plastikler, kompozitler, metal alaşımlar, vb. malzemeler odunun kullanım alanlarında kısıtlamalara sebep olmuştur. Fakat kısa süreliğine popülerliğini kaybetmiş olsa da odunun, daima çevresel sürdürülebilirliği imkanının olması, enerji üretimi için önemli bir biyokütle olması, geri dönüştürülebilir ve yenilenebilir bir doğal kaynak olması günümüzde birçok sanayi alanında ve yapısal uygulamalarda halen tercih edilmesini sağlamaktadır (Aydemir ve Gündüz, 2009; Rowell, 2012).

Odunun yaygın olarak kullanıldığı endüstriyel alanlardan en önemlisi mobilya sektörü olarak bilinmektedir. Uygun maliyetli malzemeyi seçim imkanının olması ve yapılacak işe göre işleme konusundaki ürün seçiminde alternatiflerin bulunması odunun mobilyada kullanımını güçlendirmektedir. Odunun, yenilebilir kaynaklardan olması ve yenilenemeyen kaynaklara göre sera gazı emisyonunun daha düşük olması sebebiyle mobilya sektörünün çevreci yanını güçlendirmektedir (Pinheiro ve ark., 2017).

Odunun doğal yaşayan bir malzeme olması sebebiyle higroskopik bir yapıya sahip olması, nem içeriğindeki değişimlerden kaynaklı olarak odunun çalışmasına (şişme ve daralmasına) sebebiyet vermektedir. Odunun yapısındaki bu durum, fiziksel açıdan dengede zorluklar yaşamasına, boyut açısından ise kararlı olamaması ve yüzey kalitesi düşüklüğü gibi çeşitli mekanik sorunlarla karşılaşılmasına sebep olmaktadır (Sofuoğlu, 2015; Zhong, 2021). Odundaki bu fiziksel problemlerle karşılaşma ihtimalinin en aza indirilmesi ve iyileştirmenin gerçekleştirilebilmesi için mekanik özelliklerinin iyi araştırılması gerekmektedir. Aynı zamanda odunun kullanım yeri ihtiyaçlarına göre, potansiyelinin ve ömrünün istenileni karşılaması için mekanik özelliklerinin iyi değerlendirilmesi gerekmektedir.

Odun malzemesinin kullanım alanı bakımından etkili mekanik özellikleri eğilme direnci ve elastikiyet modülüdür. Ağacın mekanik özellikleri ile ilgili değişkenliklere sebep olanlar ise yıllık halka yapısı, morfolojik özellikleri, odunun yoğunluğu, nem miktarı ve ortam sıcaklığı gibi etmenlerdir

(Hernández ve ark., 2014; Glass ve Zelinka, 2021).

Odunun mekanik özellikleri üzerindeki rutubet miktarının ve sıcaklığın etkisi değerlendirildiğinde nemin lif doygunluğu noktasının (%30 civarı) altına düşmesi ve sıcaklığın azalması halinde mekanik özelliklerinde iyileşmenin olduğu gözlenmiştir. Bu durum ham odundan elde edilen masif ahşap malzemelerde olduğu gibi ahşap kompozit malzemelerde de etkindir. Odun materyalinin hemen hemen tüm mekanik özelliklerinde sıcaklığın doğrudan etkisi söz konusudur. Yüksek veya düşük olan ortam sıcaklıklarına göre odunun mekanik özelliklerinde ciddi değişimler meydana gelmektedir (Arnold, 2010; Hernández ve ark., 2013).

Yangın gibi yüksek sıcaklığın olduğu ortamlar ile ahşap yapıların çatılarındaki kardan dolayı oluşacak düşük sıcaklıkların etkilerine göre mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Ahşap ve ahşap kompozit malzemeler ile ilgili ve konu hakkında çeşitli çalışmalar yürütülmüştür (de Moraes ve ark., 2005; Zhou ve ark., 2012). Ayrılmış ve arkadaşları (2010), ahşap esaslı kompozit malzemenin -30°C ile +30°C arasında değişen sıcaklıklardaki mekanik özelliklerini inceleyerek ahşap malzemenin sıcaklığının 0°C'den 30°C'ye çıkması halinde eğilme direncinin %12,5 ve elastikiyet modülünün ise %9,6 azaldığını, tam tersi olarak malzeme sıcaklığının 0°C'den -30°C'ye düştüğünde ise eğilme direncinde %9,8 ve elastikiyet modülünde %7,4 artış gözlemlenmiştir.

Kriyojenik işlem olarak nitelendirilen düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen işlemler malzemelerin çeşitli mekanik özelliklerini iyileştirmede tercih edilen önemli bir uygulamadır. Çalışmalarda sıcaklığın -50°C ile -100°C arasında uygulanması sıg kriyojenik işlem; -125°C'den daha düşük sıcaklıklardaki uygulanması ise derin kriyojenik işlem olarak nitelendirilmiştir (Akhbarizadeh ve ark., 2009; Özkan, 2022).

Çalışmamız, ahşap malzemenin kriyojenik işlem ile muamele edilerek mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve bu uygulamanın bir modifikasyon aracı olarak kullanılabile potansiyelini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiş ve Türkiye'de endüstriyel orman ağaçlarından biri olarak bilinen karaçamın (*P. nigra*) odun örnekleri kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan karaçam (*P. nigra*) odunu Kastamonu'daki kereste işletmelerinden temin edilmiş ve hazırlanan odun örnekleri renk değişimi-

mi, çürüme ve budak gibi herhangi bir kusur içermeyen sağlıklı odunlardan seçilmiştir.

Çalışma, hava kurusu halindeki numuneler ile gerçekleştirileceği için odun örnekleri; $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ve yaklaşık %65 bağıl nemde 2 hafta boyunca bekletilmiştir. Mekanik özellikleri incelenecek olan her bir numune ASTM D4761-19 test standartlarına uygun olarak $300 \times 20 \times 20$ mm boyutlarında 5 numune hazırlanmış ve tüm numuneler ASTM D4761-19 standardına uygun olarak; budak, çatlak, lif kıvrıklığı ve böcek tahribatı içermeyen ‘temiz’ ve ‘kusursuz’ odun kısımlarından enine ve boyuna kesilmiştir. Deneyel çalışmalarda kullanılan karaçam (*Pinus nigra*) numuneleri, TS 2474 ve ASTM D143 standartlarına uygun olarak $20 \times 20 \times 300$ mm boyutlarında hazırlanmıştır. Numunelerin makroskobik özellikleri incelendiğinde, yıllık halka sınırlarının belirgin ve homojen bir dağılım sergilediği görülmüştür. 20 mm’lik enine kesit genişliğinde ortalama 14 adet yıllık halka sayılmış olup, yıllık halka yoğunluğu 7,0 adet/cm (ortalama yıllık halka genişliği yaklaşık 1,43 mm) olarak hesaplanmıştır. Yıllık halkaların bu sıklıktaki dağılımı, numunelerin nispeten yavaş ve düzenli bir büyüme periyoduna sahip olduğunu göstermektedir. Her test grubu için 3 test yapılarak ortalamaları alınmıştır.

Eğilme deneyleri, Erzurum Teknik Üniversitesi YÜTAM laboratuvarındaki Instron marka eğilme cihazında gerçekleştirilmiştir. Yoğunluğu $0,808 \text{ g/cm}^3$, kaynama noktası $-195,8^\circ\text{C}$ ve erime noktası -196°C olan sıvı azot YÜTAM Laboratuvarı’ndan temin edilmiştir.

2.2. Sıvı azot ile muamele

Her bir odun numunesinin $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ve yaklaşık %65 bağıl nemde 2 hafta boyunca kurutma işlemine tabi tutulması sonucu hava ile kurutulan numuneler mekanik test için hazır hale gelmiştir. Mekanik test öncesi her bir numune kriyojenik ortama uygun olmaları için 10 dk boyunca sıvı azot dolu kaplara daldırılmış ve numuneler eğilme testinden hemen önce kaptan çıkarılmıştır (Şekil 1).

2.3. Yoğunluk

Hava kurusu yoğunluk tayini için, TS 2472 standardına göre $300 \times 20 \times 20$ mm ölçülerinde hazırlanan örnekler; $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ve yaklaşık %65 bağıl nem şartlarında değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar bekletilmiş ve nem içeriği hava kurusu (%12) hale getirilmiştir. Hassas analitik terazide tartılan ve dijital kumpasla boyutları belirlenen numunenin hacmi hesaplanmış ve sonrasında hava kurusu yoğunluğu aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Altınok ve ark., 2010).

$$D = \frac{W}{V} \text{ g/cm}^3$$

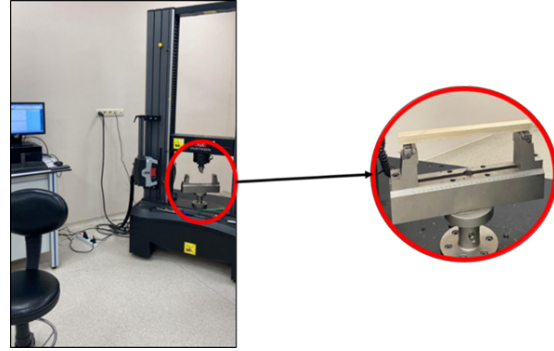
2.4. Mekanik test

Karaçam odununun eğilme mukavemeti testleri Instron marka Üiversal test cihazında ve 1 mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir. Ahşap numunelerin sıvı nitrojen den çıkarılması ile mekanik testlerin yapılması arasındaki süre 1 dakikadan az olarak ölçülmüştür. Şekil 2’de eğilme testinin gerçekleştirildiği cihaza numune yerleştirilmiş ve sonrasında eğilme mukavemetinin ölçümü için basınç uygulaması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Karaçam odunu örneklerinin sıvı azot ile muamelesi

Figure 1. Treatment of *Pinus nigra* wood samples with liquid nitrogen



Şekil 2. Eğilme mukavemeti test cihazı

Figure 2. Flexural strength testing machine

Elastisite modülü $E = \sigma / \epsilon$ N/mm² (σ =Gerilme, ϵ =Şekil değiştirme)

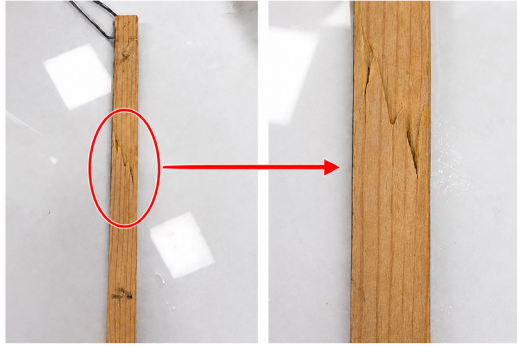
$\sigma = F / A$ (F =Uygulanan kuvvet, A =Yüzey alanı)

$\epsilon = \Delta L / L_0$ (ΔL =Uzama-kısalma miktarı, L_0 =İlk boy)

Hooke kanunu $\sigma = E \cdot \epsilon$ formülleri ile hesaplanmıştır (Güntekin ve Yılmaz, 2013).

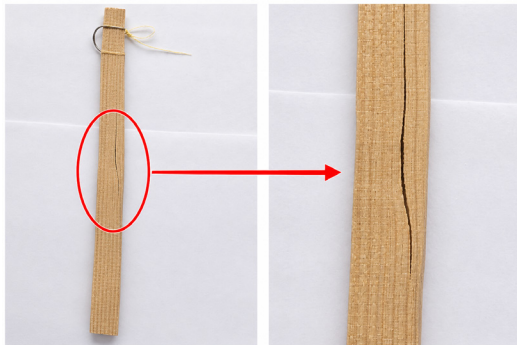
3. Bulgular

0,947 g/cm³ yoğunluğundaki Karaçam odunu örnekleri, iki hafta süresince 20°C ± 2 °C'de %65 nem oranında nem oranı denge haline gelene kadar bekletilmiştir. Sonrasında 300x20x20 mm boyutlarındaki karaçam numunesinin hava kurusu haldeki yoğunluğu 0,512 g/cm³ olarak hesaplanmıştır. Ahşap malzemenin mekanik özelliğinin tespiti için, eğilme direncinin ölçüldüğü Laboratuvar'da, oda sıcaklığında ve -196°C sıvı azot ile bir kutu içerisinde oluşturulan kriyojenik ortamda 10 dk bekletildikten sonra ölçümleri gerçekleştirilen örneklerin dış tabakalarındaki kırılmalar Şekil 3a ve Şekil 3b'de gösterilmektedir. Oda sıcaklığında (+22°C), karaçam odun örneğindeki ölçümde en dış tabakasında düz bir kırılmanın olduğu, ancak -196°C sıcaklıkla muamele edilen karaçam odun örneğinde ise ölçüm sırasında daha parçalı bir kırılmanın olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3a. Düşük sıcaklıkta (-196°C) gerçekleştirilen eğilme direnci ölçümünde karaçam odunu örneklerinin kırılma özellikleri

Figure 3a. Fracture properties of *P. nigra* wood samples in bending strength measurements performed at low temperature (-196°C)



Şekil 3b. Oda sıcaklığında (+22°C) gerçekleştirilen eğilme direnci ölçümünde karaçam odunu örneklerinin kırılma özellikleri

Figure 3b. Fracture properties of *P. nigra* wood samples in bending strength measurements performed at room temperature (+22°C)

Sıcaklığın, odun örneklerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi yapılan analiz sonucunda görülmektedir. Düşük sıcaklığın altında odunun mekanik özelliklerindeki iyileşme önceki çalışmalarda da gözlenmiştir (Jiang ve ark., 2014; Zhao ve ark., 2016). Oda sıcaklığında odun örneklerinde reçine arasındaki bağlanma kuvveti çok güçlü olmamaktadır. Düşük sıcaklıklardaki kriyojenik ortamda ise reçine sertleşme göstereceğinden dolayı oda sıcaklığına göre daha güçlü bir bağlanma yapmaktadır. Ayrıca odun örneklerinin nem içeriği mekanik özellikleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Düşük sıcaklıklarda odunun içeriğinde bulunan donmuş su moleküllerinin lifleri yapıştırıcı özellik gösterdiği için odunun donma esnasında daha yüksek mekanik özellik gösterdiği gözlemlenmiştir (Ayrılmis ve ark., 2010; Kim ve ark., 2015; Zhao ve ark., 2016).

Tablo 1'de Karaçam odunu örnekleri için gerçekleştirilen analize göre, numunelerin oda sıcaklığı (+22°C) ve kriyojenik sıcaklıktaki (-196°C) eğilme direnci (MPa), elastisite modülü (MPa) ve maksimum kuvvet ortalama ve standart sapma değerleri yer almaktadır. Tablodaki sonuçlar incelendiğinde, oda sıcaklığından kriyojenik sıcaklığa düştüğünde tüm mekanik özelliklerde artış gözlenmiştir.

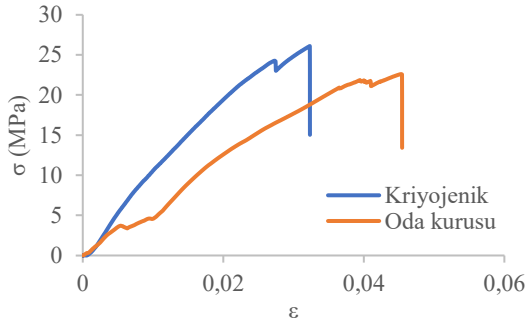
Tablo 1. Karaçam odununun oda sıcaklığında ve kriyojenik sıcaklıktaki mekanik özellikleri ve değişimi
Table 1. Mechanical properties and changes in black pine wood at room temperature and cryogenic temperatures

	Oda Sıcaklığı (+22°C)	Kriyojenik Sıcaklık (-196°C)	Değişim (%)	P değeri
Eğilme Direnci (MPa)	22,55 ± 1,12	26,07 ± 0,93	+15,6	< 0,05
Elastisite modülü (N/mm ²)	10245 ± 254	11761 ± 278	+14,8	< 0,05
Maksimum Kuvvet (N)	1564,38 ± 85	2073,02 ± 92	+32,5	< 0,01

Elde edilen verilerin istatistiksel değerlendirmesi, SPSS v26 istatistik paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gruplar arasındaki (Oda kurusu ve Kriyojenik) farkların anlamlılığı, $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde Bağımsız Örneklem T-Testi ile analiz edilmiştir. Tablo 1'de sunulan analiz sonuçlarına göre; kriyojenik sıcaklık uygulamasının hem eğilme direnci ($p = 0,0006$) hem de elastisite modülü ($p = 0,00002$) üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu durum, kriyojenik işlemin karaçam odununda yarattığı mekanik iyileşmenin tesadüfi olmadığını ve malzemenin iç

yapısındaki değişimlerden kaynaklandığını doğrulamaktadır.

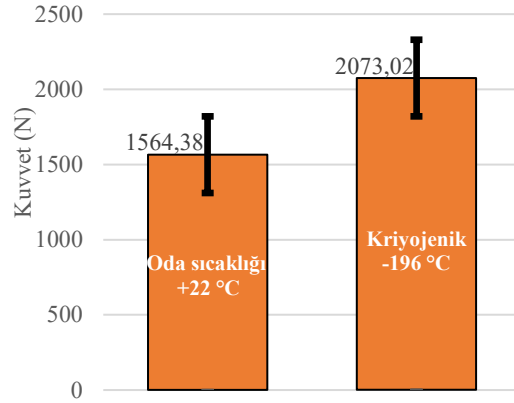
Kriyojenik sıcaklığın karaçam (*Pinus nigra*) odununun eğilme davranışı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla hazırlanan gerilme-gerinim grafiği (Şekil 4), malzemenin mekanik direncinde meydana gelen değişimi açıkça ortaya koymaktadır. Yapılan analizler sonucunda, hava kurusu örneklerin ortalama maksimum gerilme değeri 22,55 MPa olarak ölçülürken, kriyojenik işleme maruz kalan örneklerde bu değer 26,07 MPa seviyesine yükselerek belirgin bir mukavemet artışı sergilediği tespit edilmiştir. Grafik eğrileri incelendiğinde, kriyojenik koşullardaki eğrinin daha dik bir eğime sahip olması malzemenin elastisite modülünün (rijitliğinin) arttığını gösterirken; kopma anındaki gerinim değerinin hava kurusu örneklerle kıyasla daha düşük bir seviyede (0,032) kalması, düşük sıcaklığın malzemeyi daha gevrek bir yapıya sevk ettiğini kanıtlamaktadır. Kriyojenik sıcaklık uygulaması, karaçam odununun maksimum gerilme kapasitesini artırarak daha rijit bir mekanik karakter kazandırmıştır.



Şekil 4. Oda sıcaklığında ve kriyojenik ortamlardaki numunelerin gerilme-gerinim grafiği

Figure 4. Stress-strain curve of samples at room temperature and in cryogenic environments

Elde edilen veriler ışığında ve oda sıcaklığında hazırlanan numunede maksimum kuvvet 1564,38 N, kriyojenik ortamda hazırlanan numunede ise 2073,02 N olmuştur (Şekil 5). Kriyojenik ortamda hazırlanan numunede oda sıcaklığında hazırlanan numuneye göre %32 daha fazla dayanım gerçekleşmiştir. Her iki numune de gevrek kırılma davranışı sergilemiştir. Ayrıca, 300×20×20 mm boyutlardaki numunelerin Elastisite modülü verilen formüller ışığında hesaplanmış ve Karaçam (*Pinus nigra*) için oda sıcaklığındaki değeri $E_{oda}=10245 \text{ N/mm}^2$, kriyojenik sıcaklıkta ise $E_{kriyojenik}=11761 \text{ N/mm}^2$ elde edilmiştir.



Şekil 5. Kriyojenik sıcaklığın karaçam odun numunesinin eğilme mukavemetine etkisi
Figure 5. Effect of cryogenic temperature on the bending strength of the *P. nigra* wood sample

Literatürde kriyojenik işlemin mikro yapısal değişikliklere aracılık ederek birçok malzemenin sertlik, çekme ve eğilme mukavemeti gibi mekanik özelliklerini iyileştirdiği bildirilmiştir. Bu iyileşmelerin, kriyojenik sıcaklıklarda yapılan işlemler sırasında mikro yapısal pek çok faktöre bağlı olduğu da ayrıca paylaşılmıştır (Singh and Pandey, 2022). Odun hücre duvarı özelinde incelendiğinde ise, suyun moleküler düzeydeki davranışı da mekanik özellikler üzerinde belirleyicidir. Su desorpsiyonu ve donması, selüloz mikrofibrilleri ile matriks maddeler arasındaki mekanik etkileşimi değiştirerek hücre duvarının dayanıklılığını etkilediği ifade edilmektedir (Abe and Yamamoto, 2005). Bu bilgiler ışığında, kriyojenik işlemin karaçam gibi odunlarda eğilme mukavemetini ve elastisite modülünü artırması, odun içindeki suyun donmasıyla oluşan destek tabakasına bağlanabilir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, karaçam ağacından elde edilen endüstriyel odunun oda sıcaklığında ve kriyojenik sıcaklıkta (düşük sıcaklık) dondurulduktan sonraki eğilme direncinin tespit edilerek odunun bu sıcaklık değişimi neticesinde mekanik özelliklerindeki değişiminin gözlenmesi amaçlanmıştır. Oda sıcaklığında (+22°C) gerçekleştirilen eğilme direnci analizinde maksimum kuvvet 1564,38 N ölçülürken, kriyojenik sıcaklık (-196°C) ile gerçekleştirilen eğilme direnci analizinde ise 2073,02 N olarak ölçülmüştür. Hava kurusu halde kullanılan tüm örneklerin oda sıcaklığında ve kriyojenik sıcaklıkta gerçekleştirilen eğilme direnci analizlerine göre, sıcaklık oda sıcaklığından kriyojenik sıcaklığa düşürüldüğünde mekanik özelliklerinde %32 artışın olduğu tespit edilmiştir.

Düşük sıcaklık koşullarında odunun mekanik dayanımında belirgin bir artışın olduğu tespit edilmiştir ve bu durumun açıklanmasındaki en önemli bilgi odunun nem miktarı ile ilişkilidir. Odu-
nun yapısında bulunan suyun donması neticesinde hücre duvarlarında meydana gelen sertleşmeyle birlikte moleküller arasındaki mesafeler azalarak bağ kuvvetleri daha da güçlenmektedir. Bu ise odunun daha yüksek mukavemete ulaşmasına sebep olmaktadır. Odu-
nun su içeriğindeki önemine ilave olarak, kristal yapıda olması, kriyojenik sıcaklıklarda malzemenin daha kararlı hale geçmesine sebep olacağından mekanik özellikleri üzerinde de olumlu bir etki oluşturmaktadır.

Çalışmanın sonuçlarına göre, kriyojenik sıcaklıklardaki kuru ortamlarda karaçam odunun mekanik mukavemetinin yüksek olması sebebiyle kullanımı uygundur.

Yazar Katkıları

Anafikir/planlama ve literatür taraması: D. V. Koç, Veri analizi ve yorumlama: A. İmak ve D. V. Koç, Yazım, gözden geçirme ve düzeltme: D. V. Koç, A. İmak

Kaynaklar

Abe, K., Yamamoto, H. 2005. Mechanical interaction between cellulose microfibril and matrix substance in wood cell wall determined by X-ray diffraction. *Journal of Wood Science*, 51(4), 334–338. <https://doi.org/10.1007/s10086-004-0667-6>

Altınok, M., Perçin, O., Doruk, Ş. 2010. Isıl işlemin (Thermo-Process) ağaç malzemenin teknolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23: 71-84

Akhbarizadeh, A., Shafyei, A., Golozar, M.A., 2009. Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel. *Materials and Design*, 30(8): 3259-3264. Doi.org/10.1016/j.matdes.2008.11.016

Arnold, M., 2010. Effect of moisture on the bending properties of thermally modified beech and spruce. *Journal of Materials Science*, 45(3): 669-680. Doi.org/10.1007/s10853-009-3984-8

Aydemir, D., Gündüz, G., 2009. Ahşabın fiziksel, kimyasal, mekanik ve biyolojik özellikleri üzerine ısıyla muamelenin etkisi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 11(15): 71-81

Ayrılmis, N., Buyuksari, U., As, N., 2010. Bending strength and modulus of elasticity of wood-based panels at cold and moderate temperatures. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1-2): 40-43. Doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.004

Bowyer, J.L., Shmulsky, R., Haygreen, J.G., 2007. Bow-

yeretal_ch1. Şu eserde: J.L. Bowyer and J.G. Haygreen (Eds.) *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. Iowa: Blackwell

de Moraes, P.D., Rogaume, Y., Bockuet, J-F., Triboulot, P., 2005. Influence of temperature on the embedding strength. *Holz als Roh und Werkstoff*, 63(4): 297-302. Doi.org/10.1007/s00107-004-0568-9

Glass, S. V., Zelinka, S.L., 2021. Moisture relations and physical properties of wood. Şu eserde: R.J. Ross (ed.) *Wood Handbook Wood as an Engineering Material*. Wisconsin Forest Products Laboratory. researchgate.net/publication/350382519 (Ziyaret tarihi: 01.08.2025)

Güntekin, E., Yılmaz, T. 2013. Eğilmeye çalışan budaklı kirişlerin sonlu elemanlar modelleri. *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, 14: 53-57

Hernández, R.E., Passarini, L., Koubaa, A., 2013. Effects of temperature and moisture content on wood mechanical properties associated to the chipping process. Şu eserde: 21st International Wood Machining Seminar (IWMS-21). Tsukuba. researchgate.net/publication/303365671 (Ziyaret tarihi: 14.09.2025)

Hernández, R.E., Passarini, L., Koubaa, A., 2014. Effects of temperature and moisture content on selected wood mechanical properties involved in the chipping process, *Wood Science and Technology*, 48(6): 1281-1301. Doi.org/10.1007/s00226-014-0673-9

Jiang, J., Lu, J., Zhou, Y., Zhao, Y., Zhao, L., 2014. Compression strength and modulus of elasticity parallel to the grain of oak wood at ultra-low and high temperatures. *BioResources*, 9(2): 3571-3579

Kim, J-H., Park, D-H., Lee, C-S., Park, K-J., Lee, J-M., 2015. Effects of cryogenic thermal cycle and immersion on the mechanical characteristics of phenol-resin bonded plywood. *Cryogenics*, 72(1): 90-102. Doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.09.007

Özkan, O. E., 2022. Effect of Freezing Temperature on Impact Bending Strength and Shore-D Hardness of Some Wood Species. *Bioresources*, 17(4), 6123-6130. DOI:10.15376/biores.17.4.6123-6130

Pinheiro, A.P.P., Maurício, M.H.P., d'Almeida, J.R.M., 2017. Comparison of the surface properties of reused brazilwood (*Caesalpinia echinata*) and imbuia (*Ocotea porosa*) to peach palm (*Bactris gasipaes*) plantation-wood. *Wood Material Science and Engineering*, 12(5): 295-300. Doi.org/10.1080/17480272.2016.1204624

Rowell, R.M., 2012. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. Second Edition (2). Boca Raton. CRC Press

Singh, G., Pandey, K. N. 2022. Effect of cryogenic treatment on properties of materials: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 236(4), 1758–1773. <https://doi.org/10.1177/09544089221090189>

Sofuoglu, S.D., 2015. Determination of optimal machi-

ning parameters of massive wooden edge-glued panels made of european larch (*Larix decidua* Mill.) using taguchi design method. *BioResources*, 10(4): 7772-7781. Doi.org/10.15376/biores.10.4.7772-7781

Zhao, L., Jiang, J., Lu, J., 2016. Effect of thermal expansion at low temperature on mechanical properties of Birch wood. *Cold Regions Science and Technology*, 126(44): 61-65. Doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.03.008

Zhong, Z.W., 2021. Processes for environmentally friendly and/or cost-effective manufacturing. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(9): 987-1009. Doi.org/10.1080/10426914.2021.1885709

Zhou, J., Hu, C., Hu, S., Yun, H., Jiang, G., Zhang, S., 2012. Effects of temperature on the bending performance of wood-based panels. *BioResources*, 7(3): 3597-3606. Doi.org/10.15376/biores, 7(3): 3597-3606