



Emprenye ve ısıtıl işlemin karaçam (*Pinus nigra*) ağacının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkileri

Bilal Doğan¹, Osman perçin²

ÖZ: Bu çalışmada, bor bileşikleriyle emprenye işleminden sonra farklı sıcaklıklarda uygulanan ısıtıl işlemin ahşap malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, deney örnekleri %1, %3 ve %5 konsantrasyonlarında boraks (Bx) ve borik asit (Ba) çözeltileriyle 48 saat daldırma yöntemiyle emprenye edilmiş ve ardından 150°C, 170°C, 190°C ve 210°C'de üç saat ısıtıl işlem uygulanmıştır. Deney örneklerinin hava kurusu yoğunluk, liflere paralel basınç direnci (BD) ve eğilme direnci (ED) değerleri belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, ısıtıl işlem uygulanmış deney örneklerinde yoğunluk değerlerinin, artan ısıtıl işlem sıcaklığıyla azaldığını göstermiştir. Öte yandan, bor bileşikleriyle ısıtıl işlem uygulanmamış deney örneklerinin yoğunluk değerlerini artırmıştır. Bor bileşikleriyle emprenye işlemi ve ısıtıl işlem uygulaması deney örneklerinin BD özelliklerinde hafif bir artışa neden olmuştur. Ayrıca, emprenye edilmiş ve ısıtıl işlem uygulanmış deney örneklerinin ED değerleri, düşük sıcaklıklarda arttığı, yüksek sıcaklıklarda ise azaldığı tespit edilmiştir. ısıtıl işlem sırasında ED ve BD özelliklerinde görülen azalmaların, ısıtıl işlemde önce bor bileşikleriyle emprenye edilmesiyle hafifletildiği ve Bx ve Ba emprenye çözeltilerinin sırasıyla BD ve ED özellikleri üzerinde daha olumlu etkilere sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bor, ısıtıl işlem, Karaçam, Fiziksel ve mekanik özellikler

Effects of impregnation and heat treatment on the physical and mechanical properties of black pine (*Pinus nigra*) wood

ABSTRACT: In this study, the effect of impregnation with boron compounds followed by heat treatment at different temperatures on the physical and mechanical properties of wood material was investigated. For this purpose, samples were impregnated with borax (Bx) and boric acid (Ba) solutions at concentrations of 1%, 3%, and 5% using the immersion method for 48 hours, and then subjected to heat treatment at 150°C, 170°C, 190°C and 210°C for three hours. The air-dry density, compressive strength parallel to the grain (CS), and modulus of rupture (MOR) of the test samples were determined. The results indicated that air-dried density of heat-treated samples decreased with increasing heat treatment temperature. On the other hand, boron compounds increased air-dried density. The impregnation with boron compounds and heat treatment causes a slightly increase in CS properties of samples. It was also found that the MOR values of impregnated and heat treated samples increased at the initial stage of the heat treatment and decreased later. It was also determined that the decreases in MOR and CS during heat treatment were alleviated by impregnation with boron compounds before heat treatment and also the Bx and Ba impregnation solution was more favourable on the CS and MOR properties, respectively.

Keywords: Boron, Heat treatment, Black pine, Physical and mechanical properties

1 Giriş

Ahşap, insanoğlu tarafından kullanılan en eski yapı malzemelerinden biri olup, günümüzde konut, mobilya, dekorasyon elemanları ve ağaç işleri endüstrisi de dahil olmak üzere birçok yaygın kullanım alanına sahiptir (Ayata, 2024; Bal ve ark., 2023). Ahşabın dayanıklılığı, işlenebilirliği ve estetik çekiciliği, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, ses yalıtım ve akustik performans özellikleri, elektriksel iletkenliğin olmaması ve sıcaklık kararlılığı gibi olumlu özellikleri onu olağanüstü ve popüler bir yapı malzemesi haline getirmektedir (Zhang ve ark., 2020). Ahşap mükemmel bir yenilenebilir yapı malzemesi olmasına rağmen, dış mekan koşullarında bozunması ve çevredeki bağıl nemdeki dalgalanmalara bağlı olarak boyutsal kararsızlığı, biyolojik saldırılara maruz kalması, hava koşullarına maruz kaldığında görünümünde değişiklikler olması ve kolay yanması gibi bazı dezavantajları vardır (Keskin ve ark., 2009; Sevim Korkut ve Hızıroğlu, 2014).

Ahşabın kullanımını kısıtlayan olumsuz ve istenmeyen özelliklerini ortadan kaldırmak için ahşap modifikasyon yöntemleri (emprenye, ısıl işlem, kimyasal) geliştirilmiştir (Sandberg ve ark., 2017; Jones ve Sandberg, 2020). Ahşap modifikasyonu, ahşabın olumsuz özelliklerini değiştirmek veya performansını iyileştirmek anlamına gelmektedir. Etkili bir ahşap modifikasyon işlemi, ahşabın çürükçül mantarlara ve boyut stabilitesine karşı direncini artırmakta, su emilimini azaltmakta ve dış hava koşullarına karşı direncini geliştirmektedir (Hill, 2006). Ayrıca ahşap malzemenin performansını iyileştirmeye ve daha işlevsel hale getirmeye de katkıda bulunmaktadır (Zelinka ve ark., 2022).

Kimyasal modifikasyon, ahşap endüstrisindeki geleneksel yöntemlerden biri olup, son yıllarda kimyasal ahşap modifikasyon teknolojilerine olan ticari ilgi artmaktadır. Ahşabın kimyasal modifikasyonu, bir reaktifin ahşabın polimerik bileşenleriyle (selüloz, hemiselüloz ve lignin,) kimyasal reaksiyona girmesiyle gerçekleşir ve bu da reaktif ile hücre duvarı polimerleri arasında kararlı bir kovalent bağın oluşmasıyla sonuçlanır (Bari ve ark., 2019).

Bir diğer odun modifikasyon yöntemi ahşap malzemenin emprenye (kimyasal emdirmeye) edilmesidir. Ahşaba kimyasal emdirmeye işlemi, hücre duvarlarının belirli bir kimyasal karışım veya inert bir malzeme (emprenye edici maddeler) ile doyurulmasını içerir. Bu emdirmeye yönteminin temel amacı, rutubet girişini kısıtlamak, ahşabın özelliklerini değiştirmek, ömrünü uzatmak ve çürümesini azaltmaktır (Hill, 2006; Liao ve Mubarak, 2024). Ahşap malzemeler için en yaygın uygulanan koruma yöntemi, kullanım alanına göre uygun bir kimyasal ve yöntemle modifikasyon yöntemidir (Şen ve Hafizoğlu, 2001).

Bor bileşikleri, toksik olmaması, çevre dostu olması, düşük maliyeti, selülozik malzemelerde yüksek termal ve biyolojik direnç açısından yangın geciktirici olması ve ayrıca termit ve böcek gibi zararlılara karşı etkili olması gibi özellikleri nedeniyle son yıllarda ahşap koruma endüstrisinde öne çıkmış ve yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Çavdar ve ark., 2015). Bor bileşiklerinin uygulaması kolaydır ve ahşaba iyi nüfuz etme kabiliyetlerine sahiptirler. Ucuz ve kolay bulunabilmeleri, memeliler için ihmal edilebilir düzeyde toksisiteye sahip olmaları, aşındırıcı özellikleri olmaması ve ahşabın yanmaya karşı direncini önemli ölçüde artırmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Baysal, 2003; Aşçı, 2016). Geçmişte geleneksel olarak kullanılan emprenye maddeleri kreozot, bakır-krom-arsenik (CCA), Bakır/Krom/Bor (CCB), Pentaklorofenol (PCP), Boliden K33, Tanalith-CBC ve son yıllarda kullanımı artan Amonyaklı Bakır Quat (ACQ)'tır (Bal, 2006). Ancak son yıllarda, çevre koruma derneklerinin baskısı, artan çevresel kaygılar ve bu kimyasalların kullanımının sınırlandırılmasına ilişkin yönetmeliklerin uygulanması nedeniyle yakın zamanda birçok ülkede

bu kimyasalların kullanımı sınırlandırılmıştır. Ağaç işleri endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bu kimyasalların ekolojik dengeyi bozduğu ve insan ve diğer canlıların sağlığını tehdit ettiği yönünde ciddi araştırma sonuçları vardır (Aşçı ve Keskin, 2021).

Bor bileşiklerinin ahşap koruma endüstrisinde kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Buna karşın bor çözeltileri ile emprenye edilen deney örnekleri dış ortam şartlarına maruz bırakıldığında, bor bileşikleri kolayca yıkanarak ahşap malzemeden uzaklaşmaları, en önemli dezavantajlarının başında gelmektedir. Bu dezavantajın üstesinden gelmek için bor bileşiklerinin odun hücre duvarlarında daha fazla tutunması ve yıkanmasının azaltılması üzerine çalışmalar mevcuttur (Dauvergne ve ark., 2000; Kartal ve Imamura, 2004; Kartal ve ark., 2009).

Ağaç malzemenin bazı özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bir diğer etkili yöntem ise ısıtma işlemidir. Isıtma işlemi uygulanması son yıllarda önemli ölçüde artmış ve bazı ağaç özelliklerini iyileştirmek için endüstriyel bir işlem olarak büyümeye devam etmektedir (Esteves ve Pereira, 2009). Isıtma işlemi uygulamasında kimyasal madde kullanılmadığından dolayı çevreci bir odun modifikasyon yöntemi olarak değerlendirilmektedir (Johansson, 2008). Isıtma işlemi ağaç malzemenin boyutsal kararlılığını ve biyolojik direncini iyileştirirken, uygulanan ısıtma işlemi koşullarına bağlı olarak mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Isıtma işlemi sonucu mekanik özelliklerde meydana gelen azalmalar, ağaç malzemenin mekanik dayanım gerektiren farklı yük taşıyıcı sistemlerdeki kullanımını sınırlamaktadır (Şimşek Türker ve ark., 2024). Isıtma işleminin ahşap malzemenin direnç özellikleri üzerindeki etkisi karmaşık bir durum olmakla birlikte etkinin büyüklüğü, ağaç türü, uygulama sıcaklığı ve süresi, ısıtma ortamı, ahşabın nem içeriği ve atmosfer basıncı gibi belirli parametrelere bağlı olduğu değişmektedir (Fengel ve Wegener, 1984).

Awoyemi ve Westermarck (2005) tarafından yapılan çalışmada, ısıtma işleminin ahşap malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak için, deney örnekleri öncelikle bor tuzları ile emprenye edilmiş ve ardından ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak bor emdirmenin ısıtma işlemi sırasındaki direnç kayıplarının şiddetini azalttığı ve bunun alkalinin deney örneklerinin asiditesi üzerindeki tamponlayıcı etkisinden kaynaklandığını belirtmektedir. Awoyemi (2008) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise huş (*Betula pubescens*) ağacı örnekleri 0.1, 0.3 ve 0.5 M sodyum borat çözeltisi ile emprenye edilmiş ve 200 °C'de 4 saat boyunca ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Borat tuzunun ısıtma işlemi sırasında mukavemet kaybı derecesi üzerindeki azaltıcı etkisinin, konsantrasyonun 0.1 M'den 0.3 M'ye artmasıyla önemli ölçüde arttığını bildirmiştir. Ancak, 0.3 ve 0.5 konsantrasyon seviyelerinde bor tuzu ile emprenye edilmiş numuneler arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. Başka bir çalışmada Kartal ve ark., (2008), borik asit (BA) ve disodyum oktoborat tetrahidratın (DOT) emdirme ve ısıtma işleminin Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) ağacının kimyasal ve direnç özellikleri üzerinde etkilerini analiz etmişlerdir. Çalışmada, ısıtma işlemi sıcaklığına bağlı olarak direnç özellikleri ile hemiselüloz kayıpları arasında doğrudan bir ilişki olduğu ve deney örneklerinin hemiselüloz içeriği azaldıkça kopma modülündeki (MOR) kayıpların arttığı bildirilmiştir. Ayrıca, borik asit (BA) ve disodyum oktoborat tetrahidratın (DOT) deney örneklerinin pH değerini belirgin bir şekilde değiştirdiğini, ayrıca emprenye edilen örneklerin MOE değerlerindeki kayıpların, emprenye edilmeyen örneklerden daha az olduğunu bildirmişlerdir. Diğer yandan asidik yangın geciktirici kimyasallar ve yüksek sıcaklık kombinasyonunun ahşap bileşenlerinin asidik hidroliz hızını artırdığı ve böylece ahşap malzemede direnç kayıplarına neden olduğu düşünülmektedir (LeVan ve Winandy, 1990).

Isıl işlem uygulanmış ahşap malzeme döşeme, güverte, pencere ve kapı doğramaları, paneller, bahçe mobilyaları, sauna duvarları ve mobilyaları gibi birçok uygulamada kullanım alanı gün geçtikçe artmaktadır ve ahşap işleri endüstrisindeki pazar payı artarak devam etmektedir (Yıldız ve ark., 2006, Özçifçi ve ark., 2009). Bor bileşikleri uzun yıllardır ahşap koruma endüstrisinde fungusit ve insektisitlere karşı kullanılmakta ve özellikle termitlere karşı etkili olmaktadır. Bor bazlı kimyasallar ayrıca yangın geciktirici emprenye maddesi olarak kullanılmakta olup ve termal bozulmanın şiddetini önemli ölçüde azalttığı bulunmuştur (Winandy, 1997).

Literatür incelendiğinde, boraks ve borik asit ile emprenye ve ısıl işlemin ahşap malzemenin özellikleri üzerindeki etkisi araştırmacılar tarafından ayrı ayrı kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve tartışılmıştır. Ancak, bu işlemlerin etkilerinin bir arada ele alındığı sınırlı sayıda bilgi mevcuttur. Dolayısıyla, bu çalışmanın amacı, boraks ve borik asit çözeltileri ile emprenye ve ardından ısıl işlem uygulamasının Karaçam (*Pinus nigra* Arnold) odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemektir.

2 Materyal ve Metot

2.1 Ahşap malzeme

Bu çalışmada, ağaç işleri ve mobilya endüstrisinde yaygın olarak kullanılan karaçam (*Pinus nigra* Arnold) odunu deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Deney örnekleri, Kütahya, Simav'daki bir kereste fabrikasından rastgele yöntemle hava kurusu halinde satın alınmıştır. Odun malzemesi seçiminde, özellikle noksansız, düzgün büyümüş, budaksız, normal yetişmiş odunun (kusursuz, reaksiyon odunu içermeyen, böcek ve mantar zararları içermeyen) özelliklerine dikkat edilerek satın alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney örneklerinin hazırlanmasında aynı tomruktan kesilmiş ahşap levhalar kullanılmıştır. Taslak levhalardan eğilme direnci (ED) testleri için 360 mm × 20 mm x 20 mm (teğet x radyal ve boyuna yön) ve liflere paralel basınç direnci (BD) ve yoğunluk değerlerinin belirlenmesi için 30 mm × 20 mm x 20 mm boyutlarında çalışma metodolojisine uygun olarak hazırlanmıştır. Her bir deney grubu için on adet deney örneği hazırlanmıştır. Hazırlanan deney örnekleri, emprenye işleminden önce 20 ± 2 °C ve $\%65 \pm 3$ bağıl nem şartlarında bekletilmiş ve ardından emprenye edilmiştir. Deney örneklerine ait işlemler Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Deney örnekleri (a), pH ve yoğunluk ölçümü (b), emprenye işlemi (c), emprenyeli örnekler (d) (Doğan, 2018)

2.2 Emprenye işlemi

Bu çalışmada, emprenye maddesi olarak Boraks (Bx) ve Borik asit (Ba)'in %1, %3 ve %5 konsantrasyonlarındaki çözeltileri kullanılmıştır. Çizelge 1'de çalışmada kullanılan bor bileşiklerinin pH ve yoğunluk değerlerini verilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan bor bileşiklerinin özellikleri (Doğan, 2018)

Bor Bileşikleri	Çözücü	Konsantrasyon (%)	pH		Yoğunluk (g/ml)	
			EÖ	ES	EÖ	ES
Bx	Destile su	1	9.36	9.24	1.005	1.002
	Destile su	3	9.41	9.33	1.012	1.009
	Destile su	5	9.46	9.35	1.021	1.020
Ba	Destile su	1	6.97	9.67	1.003	1.003
	Destile su	3	5.97	5.68	1.011	1.004
	Destile su	5	5.13	5.22	1.015	1.014

Not: EÖ: Emprenye öncesi, ES: Emprenye sonrası

Emprenye işleminden önce, denge rutubete getirilmiş deney örnekleri %1, %3 ve %5 konsantrasyonlarında Bx ve Ba çözeltileri ile emprenye edilmiştir. Bu bağlamda, deney örnekleri ASTM D1413-76 (1976) standardına göre plastik bir kaptaki 72 saat boyunca daldırma yöntemi kullanılarak emprenye edilmiştir (Örs ve ark., 2004). Deney örneklerinin tamamı emprenye maddesine gömülecek ve yüzeyleri birbirini kapatmayacak şekilde emprenye çözeltilerine daldırılmış ve bu şekilde sabit kalmaları için üzerlerine ağırlıklar yerleştirilmiştir. Emprenye işleminden sonra, deney örneklerinin yüzeyleri hafifçe silinerek retensiyon değerlerini belirlemek için 0,01 g hassasiyetle tartılmıştır. Her bir konsantrasyon seviyesinde, tüm deney grupları için toplam retensiyon miktarı (R), aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R = \frac{G \times C}{V} \times 10^3 \text{ g/cm}^3 \quad (1)$$

Burada; G: T2–T1 (T2: Emprenye sonrası tam kuru ağırlık, T1: Emprenye öncesi tam kuru ağırlık) (g), C: Çözelti konsantrasyonu (%), V: Numune hacmi (cm³).

2.3 Isıl işlem

Bx ve Ba çözeltileri ile emprenye edilmiş deney örneklerine 150 °C, 170 °C, 190 °C ve 210 °C sıcaklıklarda 3 saat ısıtma uygulanmıştır. Bu aşamada, her bir deney grubu ve konsantrasyon seviyesi için ayrı ayrı olacak şekilde bir ısıtma işlemi fırınında (Nüve FN 120) ısıtma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra deney örneklerinin tamamı, 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve % 65 ± 3 bağıl nem şartlarında 3 hafta süreyle bekletilmiştir.

2.4 İstatistiksel analizler

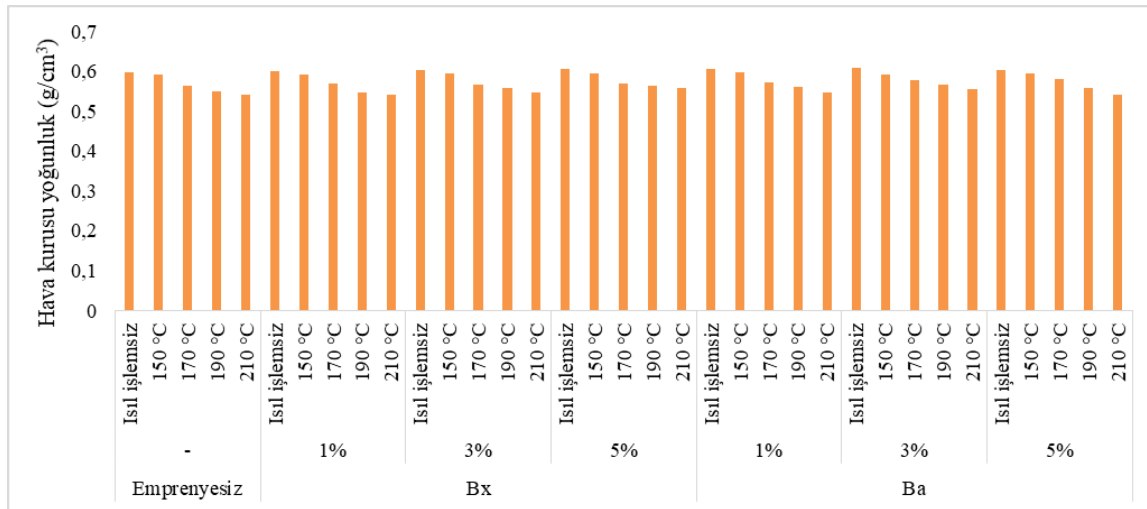
Farklı konsantrasyonlardaki (%1, %3 ve %5) Bx ve Ba çözeltileri ile emprenye edilen ve ardından ısıtma uygulanan deney örneklerinin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine ait veriler MSTAT-C yazılım paketi (Sürüm 1.42, Michigan State Üniversitesi, ABD) kullanılarak analiz edilmiştir. Grupların ortalama değerleri arasındaki farklar Duncan testi kullanılarak karşılaştırılmıştır.

3 Bulgular ve Tartışma

Bor bileşikleri ile emprenye edilen numunelerin retensiyon değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre en yüksek ortalama retensiyon değeri %5 Ba ile emprenye edilen deney örneklerinde 15.72 kg/m^3 olarak tespit edilirken, bunu %5 Bx ile emprenye edilen deney örnekleri 14.27 kg/m^3 olarak takip etmiştir. Yapılan tüm emprenye işlemlerinde bor bileşikleri konsantrasyon seviyesi arttıkça retensiyon oranının arttığı belirlenmiştir. Benzer bir çalışmada Toker (2007), boraks ve borik asit ile emprenye edilen kızılçam (*Pinus Brutia* Ten.) örneklerinin retensiyon değerini belirlemiştir. %1 borik asit konsantrasyonunda 4.78 kg/m^3 , %3 borik asitte 13.46 kg/m^3 , %5 borik asitte 27.02 kg/m^3 , %1 boraks ile 5.13 kg/m^3 , %3 boraks ile 14.83 kg/m^3 ve %5 boraks ile 24.57 kg/m^3 retensiyon oranlarının bulunduğunu bildirmiştir. Emprenye edilmiş ve ısıt işlem görmüş odun numunelerinin ortalama hava kurusu yoğunluk değerleri Şekil 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Bor bileşiklerinin ortalama retensiyon değerleri

Konsantrasyon seviyesi (%)	Retensiyon (kg/m^3)	
	Bx	Ba
1	3.44 (0.588)	2.93 (0.221)
3	9.32 (0.660)	8.61 (0.650)
5	14.27 (0.710)	15.72 (0.990)



Şekil 2. Emprenye edilmiş ve ısıt işlem uygulanmış deney örneklerinin hava kurusu yoğunluk değerleri (Doğan,2018)

Genel olarak değerlendirildiğinde uygulanan ısıt işlemin sıcaklık derecesi arttıkça, yoğunluk değerleri azalmıştır. Isıl işlemsiz örneklerle karşılaştırıldığında en az yoğunluk azalması 150°C 'de, en yüksek yoğunluk azalması ise 210°C 'de ısıt işlem uygulanan deney örneklerinde gerçekleşmiştir. Isıl işlemden sonra ahşap malzemenin yoğunluğundaki azalmanın nedenleri, ahşap malzeme bileşenlerinin (özellikle hemiselülozların) işlem sırasında buharlaşan uçucu ürünlere dönüşmesi; bazı ekstraktif maddelerin buharlaşması; ve ısıt işlem görmüş ahşabın daha az hidrofobik olması nedeniyle numunelerin daha düşük denge rutubete sahip olmasındandır (Boonstra ve ark., 2007). Yüksek sıcaklıkta ısıt işlem uygulanmış deney örneklerinin yoğunluk değerleri, düşük sıcaklıklarda ısıt işlem uygulanmış deney örneklerinden daha düşük tespit edilmiştir. Bunun nedeni hemiselülozun yüksek

sıcaklıkta daha fazla bozunmuş olmasıdır (Won ve ark., 2012). Bor bileşikleri ile emprenye edilmiş numunelerin yoğunluk değerleri, emprenye edilmemiş numunelerden biraz daha yüksektir. Ayrıca, hava kurusu yoğunluk değerlerine etkileri açısından Bx ve Ba çözeltileri arasında anlamlı bir fark yoktur. Ancak, Ba ile emprenye edilmiş numunelerin ortalama yoğunluk değerleri, Bx çözeltisi ile emprenye edilenlerden çok az daha yüksektir. Her iki emprenye çözeltisinin tüm konsantrasyon seviyelerinde emprenye edilmiş ve ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinin yoğunluk değerleri, aynı sıcaklıkta ısıtılma işlemi uygulanmış ve emprenye edilmemiş numunelerin değerlerinden daha yüksektir (%5 konsantrasyondaki Ba ile emprenye edilmiş ve 200 °C'de ısıtılma işlemi görmüş numuneler hariç). Başka bir deyişle, bor bileşikleri ile emprenye edilen deney örnekleri, emprenye edilmemiş örneklerle kıyaslandığında ısıtılma işlemi nedeniyle yoğunluk değerlerinde daha az kayıplar gerçekleşmiştir. Awoyemi ve Westermarck (2005), yüksek sıcaklıklara bağlı olarak ağaç malzemenin daha fazla bozunmasının borat emprenye edilmesiyle azaltılabileceğini bildirmiştir. Bu, alkalinin ahşabın asitliği üzerindeki tamponlama etkisinden kaynaklanıyor olabilir ve bu da ısıtılma işlemi nedeniyle ahşabın bozunma derecesini azaltmaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada, Gecer ve ark., (2015), bor bileşikleri ile ön emprenye işlemlerinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri analiz etmek için ahşap polimer kompozitler *Doğu kayınına* (*Fagus orientalis* L.) stiren ve farklı oranlardaki borik asit ve boraks emprenye edilerek hazırlanmıştır. Deney örneklerinin fırın kurusu yoğunluk değerlerinde emprenye işlemlerinden sonra önemli artışlar olduğunu, en düşük yoğunluğun ise emprenye edilmemiş deney örneklerinde tespit edildiğini bildirmişlerdir. Yangın geciktirici kimyasallara borat bazlı tamponların eklenmesinin deney örneklerinde termal bozulmayı önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir (Winandy, 1997).

Bor bileşikleri, konsantrasyon seviyesi ve ısıtılma işlemi sıcaklıklarına göre ortalama BD ve ED değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre, bor bileşiklerinin, konsantrasyon seviyesinin ve ısıtılma işlemi sıcaklıklarının deney örneklerinin BD ve ED değerleri üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır ($P \leq 0.05$). Çizelge 3'teki verilere göre, bor bileşikleri açısından en yüksek BD değeri Bx ile emprenye edilen örneklerde (47.60 N/mm^2) belirlenmiş olup, bunu sırasıyla Ba ile emprenye edilen örnekler (46.35 N/mm^2) ve emprenye edilmemiş örnekler (45.63 N/mm^2) takip etmiştir. Bu sonuçlara göre, Bx ile emprenye edilen deney örneklerinin ortalama BD değerleri, emprenye edilmeyen deney örneklerine kıyasla yaklaşık %4, Ba ile emprenye edilen örnekler göre ise %2 daha yüksektir. Konsantrasyon seviyelerine göre en yüksek BD değeri, %3 seviyesinde (47.17 N/mm^2) tespit edilirken, bunu %5 seviyesinde emprenye edilen örnekler (47.09 N/mm^2) ve %1 seviyesinde emprenye edilen örnekler (45.35 N/mm^2) izlemiştir. Isıtılma işlemi sıcaklığına göre en yüksek BD değeri 210 °C'de ısıtılma işlemi gören örneklerde (50.12 N/mm^2), bunu sırasıyla 150 °C'de ısıtılma işlemi uygulanan örnekler (47.05 N/mm^2), 170 °C'de ısıtılma işlemi uygulanan örnekler (46.62 N/mm^2), 190 °C'de ısıtılma işlemi uygulanan örnekler (45.96 N/mm^2) ve son olarak ısıtılma işlemi uygulanmayan deney örnekleri (42.87 N/mm^2) izlemiştir. Buna göre ısıtılma işlemi sıcaklığı arttıkça BD değerleri artmıştır. Benzer bir çalışmada, liflere paralel basınç direnci ısıtılma işlemi uygulamasından sonra %28, teğet yöndeki liflere paralel basınç direnci ise %8 oranında artmıştır (Boonstra ve ark., 2007).

Çizelge 3'teki sonuçlara göre, bor çözeltileri ile emprenye edilip daha sonra ısıtılma işlemi tabii tutulan test örneklerinin BD değerleri, emprenye edilmeyen deney örneklerinden biraz daha yüksektir. Ayrıca, Bx ile emprenye edilen numunelerin BD değerleri Ba'dan daha yüksektir. Ayrıca, konsantrasyon seviyesindeki artışa bağlı olarak BD değerlerinde bir miktar artış belirlenmiştir. Daha önce yapılan bir çalışmada, BD değerindeki artışın, ısıtılma işlemi görmüş

odun örneklerindeki denge nem miktarındaki azalmadan kaynaklandığı vurgulanmıştır. Böylece, ısıtma işlemi görmüş ahşabın daha az higroskopik olduğu ve maksimum bağıl su miktarı azaldığından, ısıtma işleminin direnç özelliklerine olumlu katkıda bulunabileceği ifade edilmiştir (Aytin, 2013). Başka bir çalışmada da, BD'deki artışın, ısıtma işlemi sonucu bağıl su miktarındaki azalmadan kaynaklandığı rapor edilmiştir. Buna göre ısıtma işleminden sonra amorf selülozun bozunması veya kristalleşmesi nedeniyle, yüksek derecede düzenli kristalimsi selüloz miktarı artmaktadır. Kristalimsi selüloz anizotropik bir yapı gösterdiğinden, katı ve rijit yapısı BD değerlerinde artışa neden olmaktadır (Korkut ve Kocaefe, 2009). Boonstra, (2008), yapmış olduğu çalışmada, ısıtma işleminden sonra meydana gelen liflere paralel basınç direnci değerlerindeki artışlardan, ahşap malzemenin ısıtma işleminden sonra daha az higroskopik olması, buna bağlı olarak bağıl su miktarının azalması, amorf selülozun kristalleşmesi ile kristal selüloz miktarının artması ve lignin polimer ağının çapraz bağlanmasındaki artış sorumlu tutulmuştur.

Çizelge 3. Bor bileşikler, konsantrasyon seviyesi ve ısıtma işlem sıcaklığının liflere paralel basınç ve eğilme dirençleri üzerine Duncan testi sonuçları (Doğan, 2018)

İşlemler	Faktörler	BD (N/mm ²)	ED (N/mm ²)
Bor bileşikler	Emprenyesiz	45.63 ^B	78.26 ^C
	Bx	47.60 ^A	79.43 ^B
	Ba	46.35 ^{AB}	80.88 ^A
Konsantrasyon	1%	45.35 ^B	74.89 ^C
	3%	47.17 ^A	82.13 ^A
	5%	47.09 ^A	81.54 ^B
Isıtma işlemi	Isıtma işlemsiz	42.87 ^C	77.32 ^C
	150 °C	47.05 ^B	91.48 ^A
	170 °C	46.62 ^B	82.71 ^B
	190 °C	45.96 ^B	75.93 ^D
	210 °C	50.12 ^A	70.17 ^E

Not: Üst simge Duncan testine göre homojenlik grubu (farklı harfler anlamlı bir farkı gösterir, $P \leq 0.05$).

Bu sonuçlara göre, benzer şekilde, bor bileşikler ile emprenye edilen deney örneklerinin ED değerleri, emprenye edilmemiş numunelerden daha yüksektir (Çizelge 3). En yüksek ED değeri Ba ile emprenye edilmiş test deney örneklerinde (80.88 N/mm²) tespit edilirken, bunu Bx ile emprenye edilen örnekler (79.43 N/mm²) ve emprenye edilmeyen örnekler (78.26 N/mm²) takip etmiştir. Buna göre Ba ile emprenye edilen örneklerin ED değerleri, emprenyesiz örneklerle göre yaklaşık %3, Bx ile emprenye edilen örneklerle göre ise yaklaşık %2 oranında daha yüksektir. Konsantrasyon seviyesine göre en yüksek ED değeri %3'de emprenye edilen deney örneklerinde (82.13 N/mm²) tespit edilirken, bunu %5'de emprenye edilen deney örnekleri (81.54 N/mm²) ve %1'de emprenye edilen deney örnekleri (74.98 N/mm²) izlemiştir. Diğer yandan ED değerleri de ısıtma işlem sıcaklığının artışından etkilenmiştir. Isıtma işlemi uygulanmış deney örneklerinin ED değerleri, ısıtma işlemi uygulanmayan örneklerle kıyaslandığında düşük sıcaklıklarda (150 °C, 170 °C) artarken, yüksek sıcaklıklarda (190 °C, 210 °C) azalmıştır. Literatürde benzer bir çalışmada, Sitka ladini (*Picea sitchensis* Carr.) ağacına uygulanan ısıtma işleminin başlangıç aşamalarında ED değerlerinin bir miktar arttığı, ilerleyen süreçlerde azaldığı belirlenmiştir (Kubojima ve ark, 2000). Başka bir çalışmada ise bambu örnekler 130 °C'de ısıtma işleme tabi tutulmuş ve eğilme direncinde meydana gelen değişimler analiz edilmiştir. Sonuç olarak ısıtma işlem basıncının artmasıyla

birlikte, bambunun eğilme direncinin başlangıçta arttığı daha sonra azaldığı belirlenmiştir (Li ve ark., 2023). Yüksek sıcaklıklarda mekanik dirençlerdeki azalmalar, genellikle ahşap polimerlerinin depolimerizasyon reaksiyonları (Kotilainen, 2000) ve hücre duvarı bileşenlerinin parçalanması (Yıldız ve ark., 2006) ile açıklanabilirken, ısıtılma işleminden sonra görülen direnç artışları genellikle selüloz kristalinitesindeki artışa ve çapraz bağlanma reaksiyonlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca çam ağacında düşük sıcaklıktaki ısıtılma işlemi eğilme direncinde artışlara neden olurken, 200 °C'nin üzerindeki ısıtılma işlem uygulamalarında önemli direnç kayıpları yaşanmaktadır (ThermoWood Handbook, 2003). Tüm deney gruplarında emprenye işleminin ve ardından uygulanan ısıtılma işleminin BD ve ED değerleri üzerine etkisini belirlemek için yapılan Duncan testi sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Farklı sıcaklıklarda uygulanan ısıtılma işlemi ile farklı konsantrasyon seviyelerinde bor bileşikleriyle emprenye işleminin kombinasyonu, deney numunelerinin BD ve ED özellikleri üzerinde farklı etkilere neden olmuştur (Çizelge 4). Çizelge 4 ayrıca, emprenye ve ısıtılma işleminin BD ve ED değerleri üzerinde düzenli ve istikrarlı bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Bunlara göre, BD özelliklerine ilişkin olarak en yüksek %3 oranında Bx çözeltisi ile emprenye edilmiş ve 210 °C'de ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinde (53.46 N/mm²), en düşük ise %1 konsantrasyondaki Ba çözeltisi ile emprenye edilmiş ve ısıtılma işlemi uygulanmayan deney örneklerinde (39.10 N/mm²) tespit edilmiştir. Bu verilere göre, sadece emprenye edilmiş tüm deney örneklerinin BD değerleri, emprenye edilmemiş deney örneklerinkinden düşük olduğu tespit edilmiştir. Mevcut çalışmada, sadece bor bileşikleriyle emprenye işlemi BD'yi olumsuz etkilemiş ve direnç özelliklerinde azalmaya neden olmuştur. Çizelge 4'te ED özellikleri açısından, en yüksek değer %5 konsantrasyondaki Bx ile emprenye edilen ve 150 °C'de ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinde (103.66 N/mm²), en düşük ise %1 konsantrasyondaki Ba ile emprenye edilen ve 210 °C'de ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinde (61.32 N/mm²) elde edilmiştir. Çizelge 3 ve Çizelge 4'teki bulgulara göre, ısıtılma işleminden önce deney örneklerinin bor bileşikleriyle emprenye edilmesi, ısıtılma işleminden kaynaklanan ED ve BD özelliklerindeki direnç kayıplarını hafiflettiği görülmektedir.

Can ve ark., (2010), %4 konsantrasyon seviyesinde boraks (Bx) ve borik asit (Ba) çözeltileriyle emprenye edilmiş ladin (*Picea orientalis* Link.) ve çam (*Pinus nigra* subsp.) deney örneklerini 212 °C'de 2 saat ısıtılma işlemi uygulandıktan sonra eğilme (ED) ve liflere paralel basınç (BD) dirençlerindeki değişimleri analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, Bx emdirilmiş ısıtılma işlemi uygulanmış çam örneklerinin BD değerlerinde %9'luk bir artış olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca aynı çalışmada, Ba ile emprenye edilen ve ısıtılma işlemi uygulanmış ladin örneklerinin ED değerlerinde %17, Bx ile emprenye edilmiş ve ısıtılma işlemi uygulanmış çam örneklerinin ED değerlerinde ise %14'lük bir artış olduğu rapor edilmiştir. Başka bir çalışmada, Awoyemi ve Westermarck (2005), sodyum borat ile emprenye edilmiş ve 180 °C ve 200 °C'de 2 ve 4 saat boyunca ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinin ısıtılma sırasında mekanik direnç kaybının şiddetinde bazı azalmalarla sonuçlandığı bildirilmiştir. Çalışmada bu durumun alkalinin ahşabın asitliği üzerindeki tamponlama etkisinden kaynaklandığını ve bununla ahşap malzemenin bozunma derecesini azaltabileceğini öne sürmüşlerdir. Ayrıca, uygulanan ısıtılma işlemi koşullarına bağlı olarak, ısıtılma işlemi uygulanmış ahşabın direnç özellikleri üzerinde ön işlem olarak borat emdirilmesinin olumlu etkilerini bildirmişlerdir. Doğan ve ark., (2021) tarafından yürütülen başka bir çalışmada, karaçam (*Pinus nigra* Arnold) deney örnekleri %1, %3 ve %5 konsantrasyon seviyelerinde diamonyum fosfat (DAP) ve sodyum karbonat (SC) bileşikleriyle emprenye edilmiş ve daha sonra farklı sıcaklıklarda ısıtılma işlemi tabii tutulmuştur. Sonuç olarak, ısıtılma işlemi uygulanmış deney örneklerinin liflere paralel basınç direnci (BD) ve eğilme direnci (ED) değerlerinde önemli kayıplar yaşandığı, ısıtılma işleminden

önce uygulanan emprenye işlemi bu direnç kayıplarını sınırlandırdığı bildirilmiştir. Tomak ve ark., (2011), bor emdirme işleminden sonra uygulanan yağda ısıtılma işleminin deney örneklerinin liflere paralel basınç direnci üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmadığını, aksine tarımsal bor ürünü (TB) ve yağda ısıtılma işlemlerinin kontrol grubuyla karşılaştırıldığında ED'yi artırdığını bildirmişlerdir.

Çizelge 4. BD ve ED değerleri için Duncan testi sonuçları (Doğan, 2018)

Bor Bileşikleri	Konsantrasyon	Isıl İşlem	BD (N/mm ²)	ED (N/mm ²)
Emprenyesiz	-	Isıl işlemsiz	44.75 ^{FGHI}	72.39 ^{GHIJK}
		150 °C	45.72 ^{EFGH}	95.75 ^{ABC}
		170 °C	46.31 ^{EFGH}	86.27 ^{BCDEFG}
		190 °C	42.65 ^{HIJ}	74.30 ^{FGHIJK}
		210 °C	48.71 ^{ABCDEF}	62.59 ^{JK}
	1%	Isıl işlemsiz	39.10 ^J	70.06 ^{HIJK}
		150 °C	44.72 ^{FGHI}	82.26 ^{CDEFGHI}
		170 °C	42.75 ^{HIJ}	76.08 ^{EFGHIJ}
		190 °C	45.63 ^{EFGH}	71.78 ^{GHIJK}
		210 °C	51.25 ^{ABCD}	61.32 ^K
Ba	3%	Isıl işlemsiz	42.39 ^{HIJ}	84.83 ^{BCDEFGH}
		150 °C	49.51 ^{ABCDEF}	98.11 ^{AB}
		170 °C	49.12 ^{ABCDEF}	84.37 ^{BCDEFGH}
		190 °C	49.96 ^{ABCDE}	79.24 ^{DEFGHI}
		210 °C	53.27 ^{AB}	75.02 ^{EFGHIJK}
	5%	Isıl işlemsiz	44.65 ^{FGHI}	82.27 ^{CDEFGHI}
		150 °C	48.89 ^{ABCDEF}	93.24 ^{ABCD}
		170 °C	49.36 ^{ABCDEF}	82.82 ^{CDEFGHI}
		190 °C	52.13 ^{ABC}	75.56 ^{EFGHIJK}
		210 °C	52.21 ^{ABC}	74.45 ^{FGHIJK}
Bx	1%	Isıl işlemsiz	43.22 ^{GHIJ}	79.29 ^{DEFGHI}
		150 °C	44.79 ^{FGHI}	74.21 ^{FGHIJK}
		170 °C	46.10 ^{EFGH}	70.67 ^{HIJK}
		190 °C	46.15 ^{EFGH}	71.20 ^{HIJK}
		210 °C	48.45 ^{BCDEF}	75.22 ^{EFGHIJK}
	3%	Isıl işlemsiz	40.16 ^{IJ}	77.67 ^{EFGHI}
		150 °C	49.50 ^{ABCDEF}	89.15 ^{ABCDE}
		170 °C	46.62 ^{DEFGH}	93.66 ^{ABCD}
		190 °C	45.64 ^{EFGH}	88.02 ^{BCDEF}
		210 °C	53.46 ^A	70.62 ^{HIJK}
	5%	Isıl işlemsiz	42.02 ^{HIJ}	82.81 ^{CDEFGHI}
		150 °C	48.87 ^{ABCDEF}	103.66 ^A
		170 °C	47.74 ^{CDEFG}	77.98 ^{EFGHI}
		190 °C	46.19 ^{EFGH}	74.69 ^{EFGHIJK}
		210 °C	46.06 ^{EFGH}	87.16 ^{BCDEF}

4 Sonuç ve Öneriler

Boraks ve borik asit çözeltilerinin farklı konsantrasyonları (%1, %3 ve %5) ile emprenye edildikten sonra 150 °C, 170 °C, 190 °C ve 210 °C'de 3 saat boyunca uygulanan ısıtma işleminin, karaçamın (*Pinus nigra* Arnold) hava kurusu yoğunluk, liflere paralel basınç direnci (BD) ve eğilme direnci (ED) değerleri üzerindeki birleşik etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar;

- Deney örneklerine emprenye ve ısıtma işlem uygulamalarının hava kurusu yoğunluk, BD ve ED özelliklerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir.
- Her bir bor bileşiğinin, konsantrasyon seviyesinin ve ısıtma işlem sıcaklığının BD ve ED yoğunluk değerleri üzerindeki etkisi değişkendir.
- Yüksek sıcaklıklarda uygulanan ısıtma işlem, deney örneklerinin hava kurusu yoğunluk değerlerinin azalmasında etkili olmuştur. Hava kurusu yoğunluk değerleri, artan ısıtma işlem sıcaklığından olumsuz etkilenmiş ve en yüksek değişim, 210 °C'de ısıtma işlem uygulanan deney örneklerinde tespit edilmiştir.
- Genel olarak emprenye işlemi, konsantrasyon seviyesindeki artış ve ısıtma işlem BD'nin artmasına neden olmuştur.
- Bor bileşikleriyle emprenye ve ardından ısıtma işlem uygulaması sonucunda deney örneklerinin BD ve ED özellikleri, ısıtma işlem koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir.
- Bor bileşikleriyle emprenye edilmiş deney örneklerinin ortalama ED değerleri, emprenye edilmeyenlere kıyasla göre daha yüksektir.
- ısıtma işlem görmüş deney örneklerinin ED değerleri düşük sıcaklıklarda artarken, yüksek sıcaklıklarda belirgin bir şekilde azalmıştır.
- ısıtma işlem uygulamalarından sonra meydana gelen mekanik direnç kayıplarının azaltılmasında, ön işlem olarak bor bileşikleriyle emprenye edilme yalnızca hafif ısıtma işlem koşullarında önerilebilir. Ayrıca bundan sonraki yapılacak çalışmalarda farklı emprenye çözeltilerin, ısıtma işlem uygulamalarından önce farklı ağaç türlerinde kullanılarak mekanik dirençlerdeki kayıpların azaltılmasına yönelik çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalında Bilal Doğan tarafından hazırlanan “Boraks ve Borik Asit İle Emprenye Edilmiş ve ısıtma İşlem Görmüş Karaçam Odununun Bazı Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri” isimli yüksek lisans tezi esas alınarak üretilmiştir.

Yazar Katkıları

Bilal Doğan: Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), proje yönetimi, metodolojinin belirlenmesi, araştırmanın yapılması, analizlerin yapılması, veri iyileştirme, kaynaklar, görselleştirme, makale taslak oluşturma, makale yazma, inceleme ve düzenleme. **Osman Perçin:** Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), proje yönetimi, metodolojinin belirlenmesi, veri iyileştirme, kaynaklar, denetleme, doğrulama, makale yazma, inceleme ve düzenleme.

Finansal destek beyanı

Finansal destek alınmamıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- ASTM D1413-76 (1976). Standard test method of testing wood preservatives by laboratory soilblock cultures, Annual Book of ASTM Standard.
- Aşçı, T., and Keskin, H., (2021). Strengthening the retention amount and leaching resistance of boron compounds used as impregnation material, *Journal of Polytechnic*, 24 (1), 103-112, DOI: [10.2339/politeknik.687698](https://doi.org/10.2339/politeknik.687698)
- Aşçı, T., (2016). *Modification of performance features of boron compounds used as impregnation material*. Ph.D. Thesis, Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Türkiye.
- Awoyemi, L., and Westermarck, U., (2005). Effects of borate impregnation on the response of wood strength to heat treatment, *Wood Science and Technology*, (2005) 39, 484–491, DOI: [10.1007/s00226-005-0001-5](https://doi.org/10.1007/s00226-005-0001-5)
- Awoyemi, L.,(2008). Determination of optimum borate concentration for alleviating strength loss during heat treatment of wood, *Wood Science and Technology*, 42, 39–45, DOI: [10.1007/s00226-007-0139-4](https://doi.org/10.1007/s00226-007-0139-4)
- Ayata, Ü., (2024). The effects of carbonate and vinegar mixture on selected surface properties of iatandza (*Albizia ferruginea*) wood, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 7(1), 17-25, DOI: [10.33725/mamad.1457494](https://doi.org/10.33725/mamad.1457494)
- 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, Türkiye.
- Bal, B. C., (2006). *Amonyaklı bakır quat (ACQ) emprenye tuzu ile emprenye edilen sarıçam (Pinus sylvestris L.) odununun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Bal, B.C., Altuntaş E., and Narlıoğlu N., (2023), Some selected properties of composite material produced from plastic furniture waste and wood flour, *Furniture and Wooden Material Research Journal*, 6(2), 233-244, DOI:[10.33725/mamad.1384214](https://doi.org/10.33725/mamad.1384214)
- Bari, E., Jamali, A., Nazarnezhad, N., Nicholas, D. D., Humar, M., and Najafian, M., (2019). An innovative method for the chemical modification of *Carpinus betulus* wood: A methodology and approach study, *Holzforschung*, 73(9), 839-846, DOI: [10.1515/hf-2018-0242](https://doi.org/10.1515/hf-2018-0242)
- Baysal E., (2003). Fire features of Scots pine wood impregnated with boron compounds and natural tanning materials, *Erciyes University, Journal of Applied Science Institute*, 19 (1-2), 59-69.
- Boonstra M. J., (2008). *A two-stage thermal modification of wood*, Ph.D. dissertation in cosupervision, Ghent University and Université Henry Poincaré, Nancy-Fransa.
- Boonstra, M. J., Van Acker, J., Tjeerdsma, B. F., and Kegel, E. V., (2007). Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents, *Annals of Forest Science*, 64(7), 679-690, DOI: [10.1051/forest:2007048](https://doi.org/10.1051/forest:2007048)

- Can, A., Yildiz, S., Yildiz, U. C., and Tomak, E. D., (2010). Effects of boron impregnation and heat treatment on some physical and mechanical properties of spruce and pine wood. In: The 1st International Symposium on Turkish Japanese Environment and Forestry, Trabzon, Turkey, pp. 753-766.
- Çavdar, A. D., Mengeloğlu, F., and Karakus, K., (2015). Effect of boric acid and borax on mechanical, fire and thermal properties of wood flour filled high density polyethylene composites, *Measurement*, 60, 6-12, DOI: [10.1016/j.measurement.2014.09.078](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.078)
- Dauvergne, E.T., Soulounganga, P., Gerardin, P., and Loubinoux, B., (2000). Glycerol/glyoxal: A new boron fixation system for wood preservation and dimensional stabilization, *Holzforschung*, 54, 123-126, DOI: [10.1515/HF.2000.021](https://doi.org/10.1515/HF.2000.021)
- Doğan, B. (2018). *Boraks ve borik asit ile emprenye edilmiş ve ısıtma işlemi görmüş karaçam odununun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri*, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, Türkiye.
- Doğan, B., Percin, O., and Sofuoğlu, S. D., (2021). Effects of impregnation and heat treatment on density, bending and compression properties of black pine (*Pinus nigra* Arnold) wood, *Wood Material Science & Engineering*, 17(6), 887-894, DOI: [10.1080/17480272.2021.1969685](https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1969685)
- Esteves, B. M., and Pereira, H. M., (2009). Wood modification by heat treatment: A review, *BioResources*, 4(1), 370-404, DOI: [10.15376/biores.4.1.370-404](https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404)
- Fengel, D., and Wegener, G., *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 613 pp. 1984.
- ThermoWood Handbook (2003). Finnish Thermowood Association, Helsinki, Finland. https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf (Accessed February 22, 2025).
- Gecer, M., Baysal, E., Toker, H., Turkoglu, T., Vargun, E., and Yuksel, M., (2015). The effect of boron compounds impregnation on physical and mechanical properties of wood polymer composites, *Wood Research*, 60(5), 723-738.
- Hill, C.A.S., *Wood modification: chemical, thermal and other processes*, John Wiley & Sons Ltd: West Sussex, England, 2006.
- Johansson, D., (2008). *Heat treatment of solid wood, effects on absorption, strength and colour*, Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, LTU Skellefteå, Division of Wood Physics 2008;53, ISSN: 1402-544.
- Jones, D., and Sandberg, D., (2020). A review of wood modification globally–updated findings from COST FP1407, *Interdisciplinary Perspectives on the Built Environment*, 1-31, DOI: [10.37947/ipbe.2020.vol1.1](https://doi.org/10.37947/ipbe.2020.vol1.1)
- Kartal, S. N., and Imamura Y., (2004). Effects of N'-N-(1, 8-Naphthalyl) hydroxylamine (NHA-Na) and hydroxynaphthalimide (NHA-H) on boron leachability and biological degradation of wood, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 62(5), 378-386, DOI: [10.1007/s00107-004-0500-3](https://doi.org/10.1007/s00107-004-0500-3)
- Kartal, S. N., Hwang, W. J., and Imamura, Y., (2008). Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: Chemical and strength properties of

- wood, *Journal of materials processing technology*, 198(1-3), 234-240, DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2007.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.07.001)
- Kartal, S.N., Green, F., and Clausen, C.A., (2009). Do the unique properties of nanometals affect leachability or efficacy against fungi and termites? *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(4), 490-495, DOI: [10.1016/j.ibiod.2009.01.007](https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.01.007)
- Keskin, H., Atar, M., and İzçiler, M., (2009). Impacts of impregnation chemicals on combustion properties of the laminated wood materials produced combination of beech and poplar veneers, *Construction and Building Materials*, 23(2), 634-643, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2008.02.006](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.006)
- Korkut, S., and Kocaefe, D., (2009). Effect of heat treatment on wood properties, *Düzce University Journal of Forestry*, 5(2), 11-34
- Kotilainen, R., (2000). *Chemical changes in wood during heating at 150–260 °C*. Ph.D. Thesis, Jyväskylä University, Research report 80, Finland.
- Kubojima, Y., Okano, T., and Ohta, M., (2000). Bending strength and toughness of heat-treated wood, *Journal of Wood Science*, 46, 8-15
- LeVan, S. L. and Winandy, J. E., (1990). Effects of fire retardant treatments on wood strength: A review, *Wood and Fiber Science*, 22(1), 113-131.
- Li, D., Yang, S., Liu, Z., Wang, Z., Ji, N., and Liu, J., (2023). Effects of heat treatment under different pressures on the properties of bamboo, *Polymers*, 15(14), 3074, 1-12, DOI: [10.3390/polym15143074](https://doi.org/10.3390/polym15143074)
- Liao, J., and Mubarak, M., (2024). Revolutionizing wood: cutting-edge modifications, functional wood-based composites, and innovative applications in wood industry—impacts and benefits, Edited by Zhou, X., IntechOpen, London, UK (2024).
- Örs, Y., Atar, M. and Keskin, H., (2004) Bonding strength of some adhesives in wood materials impregnated with Imersol-Aqua, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 24, 287–294, DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2003.10.007](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2003.10.007)
- Özçifçi, A., Altun, S., and Yapıcı, F., (2009). Effects of heat treatment on technological properties of wood, In 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09) Karabük. Türkiye, May 13-15.
- Sandberg, D., Kutnar, A., and Mantanis, G., (2017). Wood modification technologies-a review, *Iforest-Biogeosciences and Forestry*, 10(6), 895-908, DOI: [10.3832/for2380-010](https://doi.org/10.3832/for2380-010)
- Sevim Korkut, D., and Hızıroğlu, S., (2014). Experimental test of heat treatment effect on physical properties of red oak (*Quercus falcate* Michx.) and southern pine (*Pinus taeda* L.), *Materials*, 7(11), 7314-7323, DOI: [10.3390/ma7117314](https://doi.org/10.3390/ma7117314)
- Şen, S., and Hafizoğlu, H., (2001). The effects on the environment of some chemicals used in wood protection, National Industry – Environment Symposium and Gallery, Mersin, 25-27 April 2001, 753-758.
- Şimşek Türker, Y., Kılınçarslan, Ş., and Işıldar, N., (2024). Numerical and experimental behavior of fiber reinforced polymer type and layer number effect on the flexural properties of heat-treated black pine wood, *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 21(2), 279-289, DOI: [10.1007/s13196-024-00347-0](https://doi.org/10.1007/s13196-024-00347-0)

- Toker, H., (2007). *Borlu bileşiklerin ağaç malzemenin bazı fiziksel mekanik ve biyolojik özelliklerine etkilerinin belirlenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye
- Tomak, E. D., Viitanen, H., Yıldız, U. C., and Hughes, M., (2011). The combined effects of boron and oil heat treatment on the properties of beech and Scots pine wood. Part 2: Water absorption, compression strength, color changes, and decay resistance, *Journal of Materials Science*, 46(3), 608-615, DOI: [10.1007/s10853-010-4860-2](https://doi.org/10.1007/s10853-010-4860-2)
- Winandy, J. E., (1997). Effects of fire retardant retention, borate buffers, and redrying temperature after treatment on thermal-induced degradation, *Forest Products Journal*, 47(6), 79-86
- Won, K. R., Kim, T. H., Hwang, K. K., Chong, S. H., Hong, N. E., and Byeon, H. S., (2012). Effect of heat treatment on the bending strength and hardness of wood, *Journal of the Korean Wood Science and Tech.*, 40(5), 303-310, DOI: [10.5658/WOOD.2012.40.5.303](https://doi.org/10.5658/WOOD.2012.40.5.303)
- Yıldız, S., Gezer, E.D., and Yıldız, U. C., (2006). Mechanical and chemical behaviour of spruce wood modified by heat, *Building and Environment*, 41(12), 1762-1766, DOI: [10.1016/j.buildenv.2005.07.017](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.017)
- Zelinka, S. L., Altgen, M., Emmerich, L., Guigo, N., Keplinger, T., Kymäläinen, M., Thybring, E. E., and Thygesen, L. G., (2022). Review of wood modification and wood functionalization Technologies, *Forests*, 13(7), 1004, 1-46, DOI: [10.3390/f13071004](https://doi.org/10.3390/f13071004)
- Zhang, J. W., Liu, H. H., Yang, L., Han, T. Q., and Yin, Q., (2020). Effect of moderate temperature thermal modification combined with wax impregnation on wood properties, *Applied Sciences*, 10(22), 8231, 1-12, DOI: [10.3390/app10228231](https://doi.org/10.3390/app10228231)