

Bazı *Prunus* spp. Odunlarının Termal Davranışı ve Mikro Sertlik Değerlerinin İncelenmesi

Investigation of Thermal Behavior and Microhardness of Woods of Some *Prunus* spp.

Göksu ŞİRİN¹ 

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Almus Meslek Yüksekokulu, Ormancılık ve Orman Ürünleri Programı, Tokat, Türkiye

Article Info

Research Article

DOI: 10.29048/makufebed.1727246

Corresponding Author

Göksu ŞİRİN

Email: goksu.sirin@gop.edu.tr

Article History

Received: 25.06.2025

Revised: 17.08.2025

Accepted: 02.09.2025

Available Online: 29.12.2025

To Cite

Şirin, G. (2025). Bazı *Prunus* spp. odunlarının termal davranışı ve mikro sertlik değerlerinin incelenmesi. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 16(2), 60-70. <https://doi.org/10.29048/makufebed.1727246>

Öz: Meyve ağaçları, budama işlemleri veya ömrünü tamamlamaları sonrasında, dünya genelinde önemli miktarda biyokütle atığı üretmektedir. Bu atıklar genellikle değerlendirilmeyip ekonomik kayba sebep olmaktadır. Bu çalışmada, biyokütle geri kazanımına ve malzeme özelliklerinin belirlenmesine katkıda bulunmak amacıyla erik (*Prunus domestica* L.), kiraz (*P. avium* L.), şeftali (*P. persica* (L.) Batsch) ve vişne (*P. cerasus* L.) ağaçlarının dal odunlarının termal karakterizasyonları ve mikrosertlik değerleri incelenmiştir. Termal karakterizasyon verilerine göre, örnekler için maksimum bozunma sıcaklığı (DTGmax) 358-361 °C, maksimum kütle kaybı %57-64 ve kalıntı miktarı %36-43 arasında bulunmuştur. Mikro mekanik karakterizasyon bulgularına göre, en yüksek değer erik ve şeftali odunlarında 99 MPa olarak belirlenirken, kiraz ve vişne odunları yakın değerler göstermiştir. Sonuçlar, incelenen *Prunus* türlerinin dal odunları arasındaki termal kararlılık ve mikrosertlik farklılıklarını ortaya koyarak literatüre katkı sağlamakta ve bu biyokütlenin temel özelliklerine dair bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mikro mekanik özellikler, *Prunus* spp., termal özellikler, termogravimetrik analiz, Vickers mikro sertlik.

ABSTRACT: Fruit trees produce a significant amount of biomass waste worldwide as a result of pruning operations or at the end of their lifespan. This waste remain largely unutilized, leading to economic losses. In this study, thermal characterization and microhardness measurements of branch wood from plum (*Prunus domestica* L.), cherry (*P. avium* L.), peach (*P. persica* (L.) Batsch), and sour cherry (*P. cerasus* L.) trees were conducted to support biomass recovery and the evaluation of material properties. Thermal characterization data indicated that the maximum decomposition temperature (DTGmax), maximum mass loss, and the residue content ranged from 358 °C to 361 °C, from 57% to 64%, and from 36% to 43%, respectively. Micromechanical characterization revealed that the highest microhardness value was 99 MPa for plum and peach woods, while cherry and sour cherry woods exhibited the close values. The conclusions contribute to the literature by revealing differences in thermal stability and microhardness among the branch wood of the studied *Prunus* species, providing insights into the fundamental properties of this biomass.

Keywords: Micromechanical properties, *Prunus* spp., thermal properties, thermogravimetric analysis, Vickers microhardness.

1. GİRİŞ

Ahşap, dünya çapında büyük miktarlarda üretilen, kendini yenileyebilen ve biyolojik olarak parçalanabilir yapısıyla sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda öne çıkan doğal bir kaynaktır. Fiziksel, mekanik ve estetik niteliklerinin yanı sıra düşük maliyeti ve kolay bakım imkânları sayesinde yapı ve enerji sektöründen kompozit üretimine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir (Jiang vd., 2015; Korshunov vd., 2020; Shapchenkova vd., 2022). Ancak, artan nüfus ve tüketim oranları, odun kaynaklarının geleneksel kullanım kalıpları dışında daha verimli bir şekilde değerlendirilmesi için alternatif çözüm yollarını zorunlu kılmaktadır. Bu çerçevede, dairesel ekonomi yaklaşımı giderek daha fazla önem kazanmakta, özellikle tarım ve ormancılık sektörlerinden elde edilen lignoselülozik atıkların değerlendirilmesi stratejik bir alan haline gelmektedir (Kümmerer vd., 2020; Kandemir vd., 2022; Ionita vd., 2023).

Tarım sektörü kapsamında değerlendirilen meyve bahçeleri hektar başına 1200-2500 ağaç gibi yüksek yoğunluklarda kurulan çok yıllık ve etkin üretim alanlarıdır. Bahçelerde meyve üretiminin sürdürülebilirliği için her yıl düzenli olarak budama işlemleri yapılmakta ve bu işlemler sonucunda kayda değer miktarda odunsu atık ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, ekonomik ömrünü tamamlayan ağaçların sökülmesiyle de ek biyokütle oluşmaktadır (Winzer vd., 2017). Ancak, bu büyük atık biyokütlesi çoğunlukla yerinde yakılarak bertaraf edilmekte ve ekonomik olarak değerlendirilmeden kaybedilmektedir (Velázquez-Martí vd., 2011; Aliaño-González vd., 2022). Elde edilen odun bazlı atıkların orman ürünleri endüstrisinin artan hammadde ihtiyacını karşılamada alternatif bir kaynak olarak değerlendirilmesiyle verimlilik artırılarak doğrusal ekonomiden döngüsel ekonomiye geçişin desteklenebileceği düşünülmektedir (Kiaei vd., 2014; Şahin ve Onay, 2020).

Meyve ağaçlarının önemli bir grubu olan *Prunus* cinsi, yaklaşık 98 türü içermekte olup tüm sert çekirdekli meyveler bu cinsin altında yer almaktadır. *Prunus* içinde *Amygdalus* (şeftali ve bademler), *Prunophora* (erikler ve kayısılar) ve *Cerasus* (kirazlar) olmak üzere evrensel olarak kabul görmüş üç alt cins bulunur (Das vd., 2011). Bu alt cinslerin içerisinde yer alan birçok *Prunus* türü hem anaç olarak hem de klasik ve modern ıslah çalışmalarında kullanılmaktadır. Meyveciliğin yanı sıra bu türler, süs bitkisi, kereste ağacı ve tıbbi amaçlarla yoğun şekilde değerlendirilmektedir (Potter, 2010). *Prunus* odunlarının estetik yapısı, işlenebilirliği ve dayanıklılığı tarımsal atıklarının sistematik değerlendirilmesi ve çeşitli endüstriyel alanlarda kullanımı için teknik olarak tercih edilen bir biyomalzeme profili ortaya koymaktadır.

TGA, ahşap bileşenlerinin (selüloz, lignin ve hemiselülozlar) termal bozunması ile kütle kaybını ölçerek termal kararlılık, bozunma sıcaklıkları, reaksiyon ısı ve kömürleşme verimi hakkında bilgi sağlamaktadır (Popescu vd., 2011;

Shapchenkova vd., 2022). TGA sonuçlarının birinci türevi olan diferansiyel termogravimetri (DTG) ise bu kütle kaybının zamana veya sıcaklığa göre değişim hızını göstermektedir. Yanabilirlik özelliği yapısal bileşenlerin oranlarına bağlı olarak farklı bozunma profilleri ortaya çıkarır (Brostow vd., 2009; Sebio-Puñal vd., 2012). Odunun termal ayrışmasının (piroliz) doğası ve kinetiği, termo-hidro ve termohidro-mekanik ahşap modifikasyonları (Sandberg vd., 2013; Shapchenkova vd., 2022), ahşap bazlı karbonize malzeme, farmasötik bileşiklerdeki kalıntı solvent miktarını belirleme gibi piroliz tabanlı teknolojilerde son derece önemli bilgiler oluşturmaktadır (Aljoumaa vd., 2017; Todaro vd., 2018; Sharma ve Mohanty, 2021). Literatürde meyve ağaçlarına ait termal analiz çalışmaları, gövde, kök ya da dal odunlarından ziyade meyve kabukları, çekirdekleri ve yaprakları gibi sekonder bitki kısımları üzerinde yoğunlaşmıştır (Örn. Lam, 2013; Urruzola vd., 2014; Allouch vd., 2019; Di Blasi vd., 2019; Gözke ve Açıkalın, 2021; Ionita vd., 2023; Li vd., 2023).

Ahşap malzemenin dayanımı ve çeşitli mekanik özelliklerini belirleyen diğer bir yöntem olan mikro sertlik ölçümleri, malzemelerin kendinden daha sert bir nesne tarafından deforme edilmesine karşı gösterdiği direnci belirlemektedir (Askeland ve Fulay, 2016; Golovin vd., 2023). Hücre duvarı ölçeğinde yapılan mikro sertlik ölçümleri, ahşabın heterojen ve oldukça anizotropik yapısını etkileyen morfolojik ve kimyasal özelliklerinin anlaşılmasını sağlar (Gindl vd., 2004; Polanco vd., 2022). Bu yöntemlerden biri olan Vickers mikro sertlik testi ile ahşap malzemeler için makro düzeydeki Brinell ve Rockwell gibi testlerin yetersiz kaldığı ince ve küçük yüzeylerde dahi yüksek hassasiyetle ölçüm yapılabilir (Hirata vd., 2001; Sydor vd., 2022). Atık dal odunları, tür, yetiştirme koşulları, morfolojik özellikler ve yaş gibi faktörlere bağlı olarak değişken boyutlarda olduğundan, özellikle küçük çaplı örneklerde geniş ve düz yüzey gerektiren makro sertlik testlerinin uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. Parçaların sınırlı yüzey alanı, yıllık halka eğriliği, lif yönü farklılıkları ve yoğunluk heterojenliği, bu yöntemlerde ölçüm hatalarının ve standart sapmalarının artmasına neden olmaktadır. Bu teknik sınırlılıklar nedeniyle mikro sertlik yöntemleri kullanılarak özellikle ahşabın lif yönü ve yoğunluğuna bağlı malzeme homojenliği, yaşlanma ve doğal şartlar altındaki değişimlerin belirlenmesi, kurutma, ısıtma işlemi, emprenye gibi kimyasal veya fiziksel etkilerin değerlendirilmesi alanlarında güvenilir sonuçlar üretilebilmektedir (Aşıkuzun ve Kaymakçı, 2018). Dal odununa yönelik mikro sertlik çalışmalarına da TGA çalışmalarında olduğu gibi literatürde nadiren rastlanmaktadır. Ancak, gövde odununa ilişkin çeşitli mikro sertlik analizi araştırmaları mevcuttur. Örneğin Mareš ve Blahovec (2004) tarafından yapılan çalışmada ladin (*Picea abies* (L.) H. Karst.) ağacının yıllık halkalarındaki mikro sertlik değişimi incelenmiş ve mikro işlemcilerin, optik yöntemlere kıyasla daha verimli görüntüleme sağladığı belirtilmiştir. Gaydarov vd. (2013), işlenmiş ve işlenmemiş Balsa ağacı (*Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb.) odununun mikro sertlik analizini gerçekleştirmiştir. Ayrıca Rubino vd. (2023), doğal yapılı ve ısıtma işlemi tabi tutulmuş Ayous (*Triplachiton scleroxylon* K.

Schum.) odununun, Lo Monaco vd. (2020) ise kestane ağacı (*Castanea sativa* Mill.) odununun Vickers analizini yapmıştır.

Araştırmanın amacı, *Prunus* cinsine ait erik (*P. domestica* L.), kiraz (*P. avium* L.), şeftali (*P. persica* (L.) Batsch) ve vişne (*P. cerasus* L.) türlerinin dal odunlarının termogravimetrik analiz (TGA) ve Vickers mikro sertlik değerleri belirlenerek, literatüre özgün bir katkı sağlamak ve bu materyallerin endüstriyel kullanım alanlarına yönelik bilimsel bir altyapı oluşturmaktır.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan *Prunus* cinsine ait dört farklı türün dal odunu numuneleri, Karadeniz iklimi ile karasal iklim arasında geçiş özelliği gösteren Tokat ili Almus ilçesinden (40°17'44" K; 37°51'30" D, rakım: 854 m) temin edilmiştir. Bu bölge, yazları sıcak ve kurak, kışları ise soğuk geçen iklimatik özelliklere sahiptir. Bölgede yıl boyunca ortalama sıcaklık 11-14 °C, ortalama yağış miktarı 9-59 mm arasında değişmektedir (MGM, 2025). Ağaçların yetiştiği alan, Yeşilirmak Nehri üzerinde kurulu Almus Baraj Gölü'ne kıyısı olan bir arazidir. Büyük kütleli su yüzeyi sıcaklık ve nem rejimini düzenleyerek çevre arazilerdeki mikro iklimi değiştirmektedir. Özellikle yaz aylarında havadaki bağıl nemin artmasıyla gece-gündüz sıcaklık farkları azalmaktadır (Degü vd., 2011). Göl kıyısındaki bölgelerde rüzgâr desenlerinde de değişiklikler oluşmakta ve zaman zaman şiddetli rüzgârlar etkili olabilmektedir (Ay vd., 2001). Şekil 1, örneklerin temin edildiği bölgeyi göstermektedir.



Şekil 1. *Prunus* türleri için materyal temin bölgesi

Tüm örnekler, analiz öncesinde 20°C sıcaklık ve %65 bağıl nem koşullarında, ahşap materyallerin analizlerinde referans nem içeriği olarak kabul edilen %12 nem oranına

getirilmiştir (ISO, 2019).

2.1. Termogravimetrik Analiz

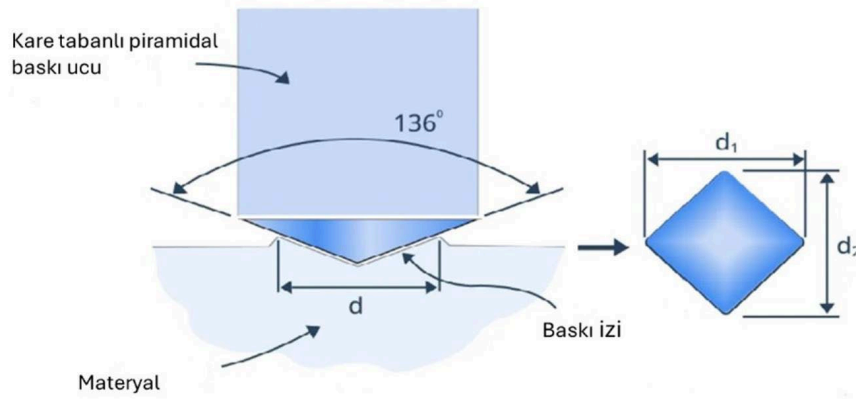
TGA testi için Setaram TG-DTA cihazı ile kütle kaybı ve ısı akışı eş zamanlı olarak belirlenmiştir. Odun örneklerinin termal kararlılıkları ve ayrışma kinetiklerini belirlemek amacıyla, her biri yaklaşık 5-10 mg ağırlığında numuneler kullanılmıştır. Numuneler, 50 mL/dk saf azot (N₂) akışı atmosferi altında, 10°C/dk ısıtma hızıyla 20°C'den 800°C'ye kadar ısıtılmıştır. Tüm ölçümlerde reaktif olmayan, yüksek sıcaklığa dayanıklı alüminyum oksit (Al₂O₃) potalar tercih edilmiştir. Elde edilen TGA grafiklerinden *Prunus* türleri dal odunlarının bozunma sıcaklık aralıkları, kütle kaybı ve kalıntı miktarı tespit edilmiştir. TGA'nın türevi olan DTG eğrileri ise odunların yapısal bileşenlerine (hemiselüloz, selüloz, lignin) ait maksimum bozunma hızlarını ve aşamalarını tepe noktaları (zirveler) halinde daha hassas bir şekilde tanımlamıştır.

2.2. Mikro Yüzey Sertliği Analizi

Vickers mikro sertlik testleri, dal odunu örneklerinde liflere paralel doğrultuda hazırlanan kesitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin test öncesi hazırlığı için hacimce 2:1 oranında toz ve sıvıdan oluşan akrilik esaslı reçine kullanılarak soğuk kalıplama (bakalit alma) işlemi yapılmıştır. Kalıplanan numuneler, test edilebilir sertliğe ulaşana kadar beklendikten sonra, optik mikroskop altında doğru girinti ölçümleri yapılabilmesi için parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Yüzey düzgünlüğü ve pürüzsüzlüğünün sağlanması amacıyla parlatma işlemi sırasıyla 400, 1200, 2500 ve 4000 grid zımparalar ile kademeli olarak tamamlanmıştır. Sertlik testleri, Türk Standartları Enstitüsü tarafından yayımlanan ilgili standartlara uygun olarak (TSE, 2023) Highwood HWDM-3 Vickers sertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında numunelere, 136 derecelik yüz açılarına sahip kare tabanlı, piramit şeklindeki bir elmas uç ile 25 gram statik yük uygulanmıştır. Test sonrasında, malzeme yüzeyinde oluşan plastik deformasyon veya iz, optik mikroskopla görselleştirilerek Vickers sertlik değerini belirlemek üzere girinti köşegenleri ölçülmüştür. Her bir ağaç türü için 10 farklı noktadan ölçüm alınmış ve ortalama sertlik değeri Denklem 1'e göre cihaz tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sertlik değerleri megapascal (MPa) birimine dönüştürülerek sunulmuştur.

$$HV = 1854.4 \frac{F}{D^2} \quad (1)$$

Burada HV: Vickers sertliği (KgFmm⁻²), 1854,4: Sabit değer, F: Uygulanan yük, D: D₁ ve D₂ olarak iki diyagonalin aritmetik ortalaması (mm)'dir. Şekil 2'de, Vickers mikro sertlik test süreci görülmektedir.



Şekil 2. Vickers mikro sertlik test süreci (WSL, 2025)

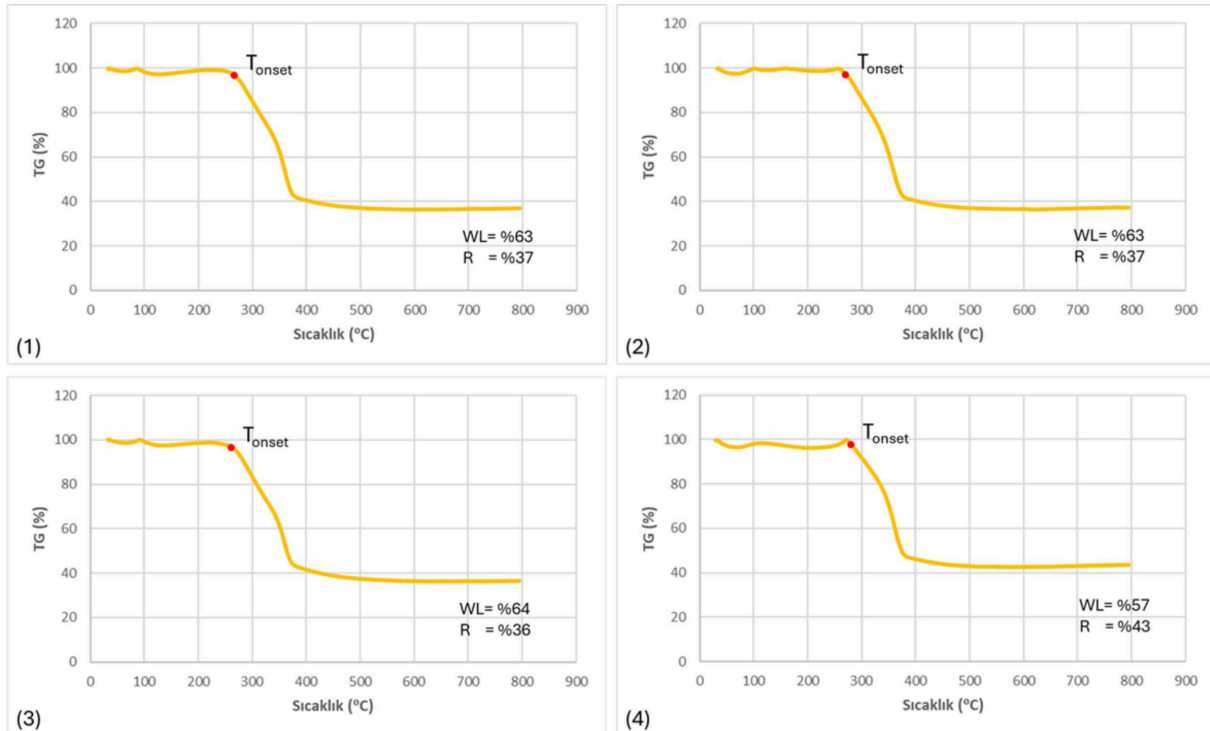
3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Termogravimetrik Analiz Bulguları

Prunus türlerine ait termal bozunma profilleri, Şekil 3'te sunulan TGA grafikleri ile gösterilmiştir. TGA eğrileri incelendiğinde, malzemelerin sıcaklığa bağlı kütle kaybını gösteren üç belirgin aşama gözlemlenmiştir. Termogramlar, her bir türün ısıl stabilitesi, kütle kaybı (WL) ve kalıntı oranı (R) bakımından farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Başlangıç aşamasında ahşap tarafından adsorbe edilen su ile ahşabın uçucu bileşenlerinin sistemden uzaklaştırılmasına bağlı bir kütle kaybı söz konusudur (Beram ve Yaşar, 2018; Vargun vd., 2019; Ramazanoğlu ve Özdemir, 2023). Karbondioksit, inorganik bileşiklerin izleri

ve su buharı gibi yanmayan ürünler 30-150 °C arasında meydana gelmektedir (Shapchenkova vd., 2022). Kumar vd. (2008), su ve uçucu bileşiklerin uzaklaşması için aralığın 180 °C'ye kadar olabileceğini belirtmiştir. Dal odunu numunelerinin TGA eğrilerinin ilk bölümünde 85 °C-120 °C arasında beklenmeyen bir kütle artışı görülmüştür. Bozunmanın erken evresinde hafif bir ağırlık artışı, TGA ekipmanının kaldırma kuvveti (Buoyancy effect) etkisinden kaynaklanabilmektedir. Kaldırma kuvveti etkisi, dengedeki atmosferin yoğunluğu artan sıcaklıkla azaldığında ortaya çıkar ve görünür kütle kazanımı ile sonuçlanır (Chartoff ve Sircar, 2002; Gabbott, 2008).



Şekil 3. *Prunus* türleri dal odunlarına ait TG termogramları: (1) Erik, (2) Vişne, (3) Kiraz, (4) Şeftali

Odunun asıl bozulmaya başladığı ilk eşikten sonraki ikinci aşamada, hücre çeperinde kalan su ve ekstraktiflerle birlikte, odunun yapısal bileşenleri olan selüloz, hemiselüloz ve lignin de değişime uğramaktadır (Mészáros vd., 2007; Beram ve Yaşar, 2018). Grafikteki onset noktası, çoğunlukla hemiselüloz ayrışmasının başladığı sıcaklık olarak değerlendirilir. En düşük termal kararlılığa sahip olan amorf yapılı hemiselülozlar (Vargun vd., 2019), asetil gruplarının varlığı nedeniyle (Sebio-Puñal vd., 2012) 190°C-380°C sıcaklık aralığında hızla kaybolurlar (Esteves ve Pereira, 2009; Popescu vd., 2011). Bu aşamada organik asit, özellikle asetik asit (Ergün vd., 2024), CO, CO₂, yoğunlaşabilir buharlar vb. gaz ürünler oluşur (Üner vd., 2016).

Çalışmada tüm türler için bozunmanın başladığı onset sıcaklığı (T_{onset}) yaklaşık değerler göstermiş ve 271°C-286°C arasında değişmiştir. En düşük onset sıcaklığı vişne odunu için ölçülmüştür. Dolayısıyla termal stabilitesi en zayıf örnek olarak görülmektedir. Vişne odununda bulunan ekstraktif maddelerin oranı ilk aşamada bozunmaya etki etmiş olabilir. Yüksek ekstraktif madde içeriğinin bozunma sürecini hızlandırdığı ve daha düşük sıcaklıklarda dönüşüm değerlerinde bir artışa neden olarak odun termal kararlılığını azalttığı bilinmektedir (Poletto, 2012). Şeftali odunu ise en yüksek değeri oluşturarak nispeten geç bozunmaya başlamıştır ve termal kararlılığı daha yüksektir. Bu durum hemiselüloz oranının az olduğu ya da hemiselülozların daha stabil bir yapıya sahip olduğu şeklinde yorumlanabilir.

İkinci aşamada grafiklerde tüm türler için onset sıcaklıklarından itibaren yaklaşık 271°C-385°C arasında kademeli olmayan tek bir keskin düşüş çizgisi izlenmektedir. Hemiselülozların bozunmasını takiben selüloz bozunması başladığında TG eğrisi tipik olarak büyük bir omuz ya da tepe bölgesi meydana getirir (Jeske vd., 2012). Kademeli olmayan süreç hemiselülozlar ve selüloz ayrışmasının net olmadığı selüloz baskın bir bozunmayı göstermektedir. Kristalin ve amorf yapılı (semikristalin) selüloz, odunun kuru ağırlığının %40-%55'ini oluşturduğundan en yüksek oranda kütle kaybına neden olan bileşiktir (Popescu vd., 2011) ve bozunması 240°C-350°C arasında gerçekleşir. Düşüş, selülozun kristalin yapısının parçalanmasıyla açıklanabilir. Bu yapılar oldukça düzenli ve büyük moleküllerdir. Selülozun termal kararlılığı, kristalinite indeksi, kristalit boyutu, polimerizasyon derecesi (Poletto vd., 2012) ve ekstraktiflerden etkilenebilir (Shapchenkova vd., 2022). Ayrışmaların aniden ve topluca gerçekleşmesi hızlı bir kütle kaybı oluşturarak grafikte keskin bir eğim şeklinde görülür. Şeftali örneğinde düşüş diğer türlere göre daha dik ve ani olmuştur. Bu durum, incelenen diğer *Prunus* türlerine kıyasla selüloz içeriğinin yüksek olduğunu, hemiselüloz yapısının daha az stabil olduğunu göstermektedir. Erik, vişne ve kiraz örneklerinde oldukça benzer bir düşüş eğimi

izlenmiştir. Örneklerde oluşan kütle kaybı eğrisi, dengeli ve sürekli bir azalma eğilimi sergileyerek hemiselüloz ve selüloz ayrışmalarının yakın sıcaklık aralıklarında gerçekleştiğine işaret etmektedir.

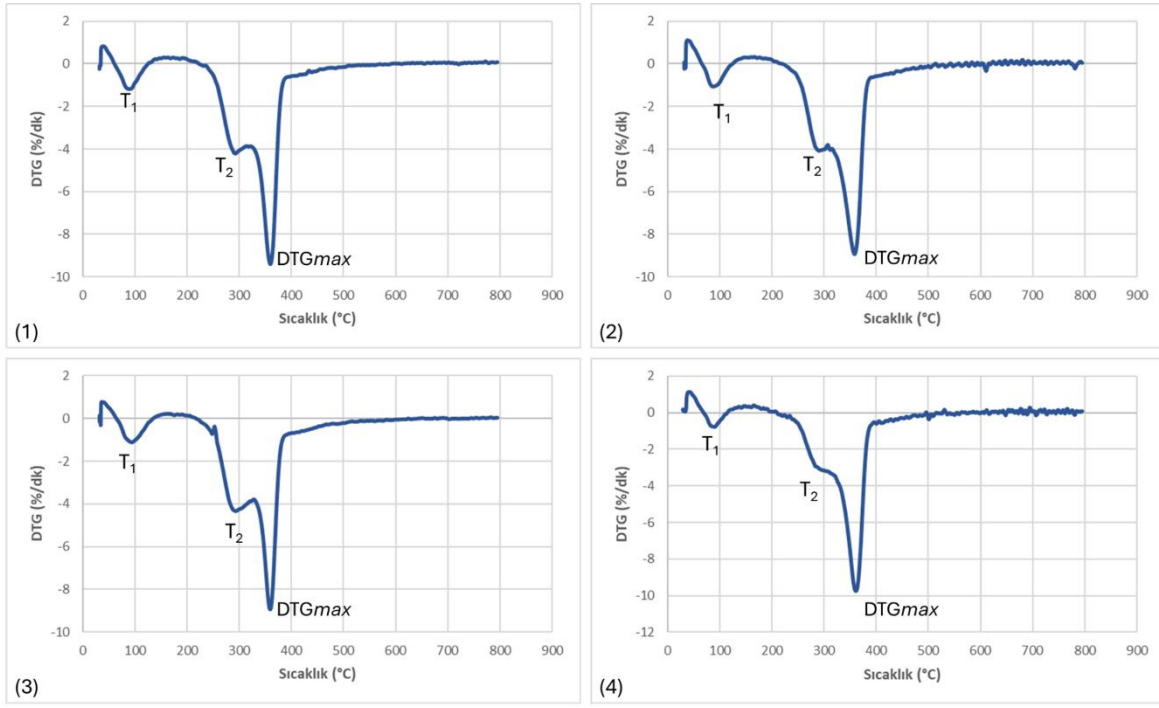
En yüksek sıcaklık değerlerinde gerçekleşen son aşamada ligninin termal bozunması meydana gelmekte ve odunun tam olarak ayrışması 400°C civarına kadar sürmektedir (Aydemir vd., 2024). Lignin, yapısındaki çeşitli oksijen fonksiyonel gruplarının farklı termal kararlılığa sahip olması nedeniyle 170°C-600°C gibi geniş bir sıcaklık aralığında yavaşça ayrışır (Brebu ve Vasile, 2010; Perçin vd., 2016). Termal bozunma süreci boyunca, kütle kaybı neredeyse sabit bir seviyeye ulaşmaya kadar sürekli olarak devam etmiştir. Grafiğin yatay bir seyir izlemeye başladığı 400°C'den sonraki kısımlar, numunelerin termal bozunmasının büyük ölçüde tamamlanarak nihai kütleyle ulaşıldığını ve artık karbon kalıntısı (char) oluşumunun başladığını göstermektedir (Safi vd., 2004; Shapchenkova vd., 2022). Ahşabın termal ayrışma sürecinde, genellikle yanıcı veya toksik olan küçük moleküller uzaklaştıktan sonra kalan kömürleşmiş kütle büyük oranda lignine aittir (Protásio vd., 2017). Órfão vd. (1999) ve Yang vd. (2007)'a göre, kömür verimine lignin %37-46, hemiselülozlar %20 ve selüloz %5 katkı sağlamaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre tüm *Prunus* türlerinin termal bozunmasının 450°C-550°C aralığında sona erdiği görülmektedir. Şeftali dal odunu, daha az uçucu bileşen veya daha fazla termal olarak kararlı (ayrışmayan) bileşen içeriği nedeniyle en düşük kütle kaybı oluşturan tür olmuştur. Maksimum kütle kaybı oranı kiraz ağacında en yüksek olarak belirlenmiştir. Ancak kiraz, vişne ve erik dal odunları için kütle kaybı ve kalıntı miktarı oldukça yakın değerlerdedir. Bu türlerin kalıntı miktarının fazlalığı şeftali odununda olduğu gibi yüksek lignin içeriğini göstermektedir (Tablo 1).

Tablo 1. *Prunus* türleri dal odunlarının termal bozunma parametreleri

Ağaç türü	T_{onset} (°C)	Kaybedilen kütle (%)	800°C'de kalan kütle (%)
Erik	274	63	37
Kiraz	272	64	36
Şeftali	286	57	43
Vişne	271	63	37

Şekil 4 *Prunus* türlerine ait dal odunlarının DTG eğrilerini göstermektedir. Eğriler genel olarak esas bileşenlere ait kütle kaybı aşamaları sayısını ve kömürün yanmasını temsil eden pikler içermektedir (Janković vd., 2020). DTG eğrilerinin yapısı, her bir türün özgün termal bozunma karakteristiklerini yansıtmaktadır (Safi vd., 2004; Shapchenkova vd., 2022).



Şekil 4. Prunus türleri dal odunlarına ait DTG eğrileri: (1) Erik, (2) Vişne, (3) Kiraz, (4) Şeftali

Yaklaşık 85°C-400°C aralığında tüm türler için DTG eğrilerinde üç önemli pik noktası (T_1 , T_2 , DTG_{max}) bulunmaktadır. İlk pik noktası (T_1) için en yüksek değer kiraz odununda elde edilmiştir (96°C). Bu aşamada, ikinci pik noktalarının görüldüğü yaklaşık 300°C'ye kadar malzemeler, inert atmosfer ortamı nedeniyle önemli bir oksidasyona uğramaz. Ancak, düşük enerjili bağların kopması, makromoleküllerde hidrojen bağlarının yeniden oluşumu, kristalin/amorfor bölgelerin kısmen dönüşümü ve polimer zincirlerinin gevşemesi gibi yapısal yeniden düzenlenme süreçleri ile pirolitik karakter taşıyan termokimyasal dönüşümler başlamaktadır (Órfão vd., 1999). Bu değişimler büyük kütle kaybı oluşturacak ölçüde olmasa da sonraki ayrışma aşamalarında bozunma hızını ve ürün dağılımını etkiler (Órfão vd., 1999; Yang vd., 2007; Poletto vd., 2012). İkinci pik noktaları (T_2) civarında ise süreç hızlanmakta ve hemiselüloz ile selülozun ayrışmasıyla birlikte belirgin bir kütle kaybı gerçekleşmektedir. Hemiselülozlar ile selülozun ayrıştığı ve dehidrasyona uğradığı sıcaklıktaki bu ikinci belirgin pik noktaları tüm örnekler için 289°C-291°C aralığında yakın değerler göstermiştir. Su moleküllerinin uzaklaşmasıyla odunun kuru madde içeriği ve birim kütledeki enerji yoğunluğu artmaktadır. Özellikle biyokütle enerjisi üretiminde bu durum önemlidir. Genellikle su kaybı, malzemenin daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı hale gelmesine yardımcı olabilir (Gao vd., 2004). Şeftali örneği, en keskin selüloz ayrışma pikine sahiptir. Bu durum, kristalin selüloz oranının yüksek ve termal kararlılığın fazla olduğunu göstermektedir. Erik, kiraz ve vişne odunları benzer eğriler oluşturmuştur. Bu örneklerin çok fazla DTG eğrileri farklı bileşenlerin kademeli ayrıştığını ve özellikle lignin oranının yüksek olduğunu göstermektedir.

Dal numunelerinde DTG_{max} değerleri 358°C-361°C arasında değişmiştir. En yüksek DTG_{max} değeri yine şeftali

odununda meydana gelirken en düşük değer vişne odununda görülmüştür. Termal kararlılık DTG_{max} pik sıcaklığı olarak tanımlandığında, vişne odununun incelenen Prunus türleri arasında en az, şeftali odununun ise en yüksek termal kararlılığa sahip olduğu söylenebilir. Hemiselülozlar, selüloz ve lignin bozunması aşamalarının farklı sıcaklık aralıklarında gerçekleşmesi her ağaç türünün içerdiği farklı bileşik miktarları ile açıklanabilir.

Elde edilen sonuçlar, bu biyokütle arasında özellikle T_2 pik noktası ve DTG_{max} değerleri bakımından önemli bir fark olmadığını göstermektedir (Tablo 2).

Tablo 2. DTG ile elde edilen termal bozunma parametreleri

Ağaç türü	T_1 (°C)	T_2 (°C)	DTG_{max} (°C)
Erik	90	291	360
Kiraz	96	290	359
Şeftali	84	291	361
Vişne	89	289	358

3.2. Vickers Yüzey Sertliği Bulguları

Araştırma kapsamında incelenen dört farklı Prunus türüne ait dal odunu örneklerinin ortalama Vickers mikro sertlik değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Yüzey sertliği sonuçları en yüksek değerin şeftali ve erik odununda en düşük değerin vişne odununda elde edildiğini göstermektedir. Minimum ve maksimum değerler dikkate alındığında, her tür içinde belirli bir varyasyonun mevcut olduğu görülmektedir. Erik odunu ölçüm değerleri geniş bir dağılım aralığı sergilemektedir. En düşük standart sapma ise şeftali odununda gözlemlenmiş olup, bu durum söz konusu türün daha homojen bir mikro sertlik yapısına sahip olabileceğine işaret etmektedir.

Tablo 3. *Prunus* türleri için Vickers yüzey (HV) sertliği sonuçları

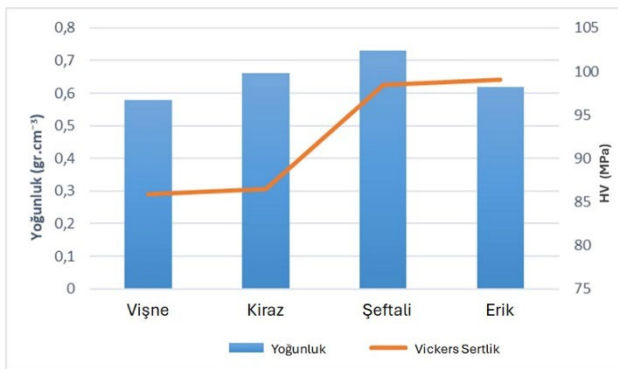
Ağaç türü	$\bar{X}HV$ (MPa)	Max. (MPa)	Min. (MPa)
Erik	99 (± 22)*	121	70
Kiraz	87 (± 13)*	101	71
Şeftali	99 (± 9)*	108	84
Vişne	86 (± 15)*	106	71

*Parantez içindeki değerler standart sapmayı göstermektedir.

Ağaçlarda yoğunluk arttıkça sertliğin de genellikle olumlu yönde etkilendiği bilinmektedir. Daha yoğun bir yapı, birim hacimde daha fazla malzeme içermekte dolayısıyla dışarıdan gelen kuvvetlere karşı daha fazla direnç göstermektedir. Wiemann ve Green (2007) yaptıkları çalışmada, sertlik ile özgül ağırlık arasındaki ilişkinin hem odunun yoğunluğuna hem de botanik kökenine bağlı bir parametre olduğunu öne sürmüşlerdir. İncelenen ağaçların yoğunluk değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Şekil 5, yoğunluk değerleri ile çalışmadan elde edilen Vickers sertlik değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şeftali, en yüksek yoğunluk ve Vickers sertlik değerine sahiptir. Erik türü hariç diğer ağaçlar için de yoğunluk ve Vickers sertliği arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, incelenen türlerin dal odunları için yoğunluk arttıkça yüzeylerine uygulanan kuvvetlere karşı direnç (sertlik) de artma eğilimindedir. Erik örneğinde görülen farklılık, bazı durumlarda sertliğin odun yapısındaki diğer faktörlerden de (hücre duvarı bileşimi ve kalınlığı, lif açısı ve yoğunluğu, mikrofibril açısı, kimyasal bileşim vb.) etkilenebileceğini göstermektedir.

Tablo 4. *Prunus* türlerinin yoğunluk değerleri

Ağaç türü	Yoğunluk (gr.cm ⁻³)	Kaynak
Erik	0,62	Govorčin vd. (2012)
Kiraz	0,66	Passialis ve Grigoriou (1999)
Şeftali	0,73	Passialis ve Grigoriou (1999)
Vişne	0,58	Söğütü vd. (2016)

**Şekil 5.** *Prunus* türlerinin yoğunluk ve Vickers mikro sertlik özellikleri ilişkisi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, *Prunus* cinsine ait erik, kiraz, şeftali ve vişne türlerinin dal odunlarının termal davranışları ile mikro

sertlik özellikleri belirlenerek türler arası karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır.

TG analizlerine göre, incelenen tüm türlerde hemiselüloz, selüloz ve lignin bozunma süreçleri literatürde belirtilen sıcaklık aralıklarında ve benzer şekilde meydana gelmiştir. Türler arasında termal kararlılık düzeyleri farklılık göstermiş ve şeftali dal odunu, daha yüksek onset sıcaklığı ile ısı bozunmaya karşı en dirençli tür olarak belirlenmiştir. Şeftali aynı zamanda en düşük kütle kaybı ve en yüksek kalıntı miktarı oluşturan tür olmuştur. Erik, kiraz ve vişne türlerinde ise onset sıcaklıkları, kütle kaybı ve son kalıntı miktarları birbirine yakın düzeydedir. DTG sonuçları, en yüksek kütle kaybı hızının tüm türlerde selüloz bozunma evresinde gerçekleştiğini, ancak bu hızın türler arasında değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Şeftali dal odunu, daha düşük bozunma hızı ile diğer türlere göre termal açıdan daha stabil bir yapı sergilemiştir. Tüm numunelerde elde edilen yüksek kalıntı oranı, lignin içeriğinin fazla olduğunu göstermektedir. Ligninin geniş sıcaklık aralığında yavaş bozunma eğilimi, selüloz ve hemiselülozdan sonraki bölgede kütle kaybını yavaşlatarak yüksek sıcaklıklarda daha fazla kalıntı oluşmasına neden olmaktadır. Bu özellik, biyoyakıt üretimi, karbon bazlı malzemeler ve yüksek enerji verimliliği sağlayan termal uygulamalar açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

TGA verilerinin sağladığı ayrıntılı ısı bozunma profilleri, elde edilen biyokütlenin enerjiye dönüştürülme yöntemlerine uygunluğunu belirlemede kritik öneme sahiptir. Özellikle onset sıcaklığı, DTG_{max} ve kalıntı oranı gibi parametreler, piroliz reaktörlerinde ısıtma düzeni, gaz akış hızı, inert atmosfer yönetimi ve yoğunlaştırma sistemleri gibi işlem bileşenlerinin çalışma koşullarının iyileştirilmesinde kullanılabilir. Böylece, farklı *Prunus* türlerinin ısı özellikleri dikkate alınarak enerji verimliliği artırılabilir, ısı kayıpları azaltılabilir ve hedeflenen ürün dağılımına uygun işletim yöntemleri geliştirilebilir.

Vickers mikro sertlik analizleri, *Prunus* türlerinin dal odunlarının yüzey sertlik değerlerinde belirgin farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Şeftali ve erik dal odunlarının ortalama sertlik değeri diğer türlerden yüksek bulunmuştur. Vişne ve kiraz türleri ise daha düşük ve yakın değerler sergilemiştir. Sonuçlar, incelenen türler için odun yoğunluğu ile mikro sertlik arasında, erik odunu hariç, pozitif bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Bu ilişki, daha yoğun bir mikro yapının, malzemenin deformasyona karşı direncini artırdığı yönündeki genel prensibi desteklemektedir. Vickers mikro sertlik bulgularına göre araştırılan türler içerisinde şeftali odunu hem yüksek yoğunluk hem de sertlik karakteristikleri ile yüzey dayanımı ve aşınma direnci gerektiren alanlar ve yapısal uygulamalar için potansiyel olarak en uygun türdür. Buna karşılık vişne ve kiraz odunları, düşük yoğunluklu, kolay işlenebilir yapısal özellikleriyle kaplamacılık, yalıtım ve ambalaj materyalleri gibi çeşitli endüstriyel alanlar için tercih edilebilir.

Brinell, Janka ve Rockwell gibi sertlik test yöntemleri, ölçüm yapılabilmesi için geniş, düzgün yüzeyli ve belirli boyut

standartlarını karşılayan numuneler gerektirmektedir. Ancak bu tip yöntemlerin, tarımsal atık olarak değerlendirilen, boyut ve şekilleri düzensiz, gövde odununa kıyasla daha heterojen yapıya sahip dal odunlarında uygulanması oldukça zordur. Gerçekleştirilen Vickers sertlik testleri, odunun mikro mekanik davranışını inceleyerek makro düzeyde gözlemlenen özelliklerin temelini oluşturan mikro ölçekli deformasyon mekanizmalarının anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Literatürdeki bulgular da bu yöntemin çok yönlülüğünü desteklemektedir. *Prunus* türlerine ait dal odunlarının mikro düzeydeki deformasyon mekanizmalarının anlaşılması, elde edilen bulguların makro ölçekli mekanik davranışla ilişkilendirilmesine olanak tanıyarak, yapısal ahşap mühendisliği, mobilya, kaplama ve biyomalzeme tasarımı gibi alanlarda malzeme performansının daha doğru öngörülmesini sağlayabilir. Bu veriler, odunun mekanik özelliklerini mikrodan makroya tüm ölçeklerde açıklayabilen kapsamlı modellerin geliştirilmesinde ve çok ölçekli sonlu eleman analizleri ile moleküler dinamik simülasyonları gibi hesaplamalı modellemelerde kullanılabilir.

TGA ve mikro sertlik testleri, odunun farklı koşullar altındaki performansını kapsamlı biçimde karakterize etmek için birbirini tamamlayan veriler sunmaktadır. Termal ve mekanik özellikler, ahşabın yoğunluğu, gözenekliliği, nem içeriği ve mikro yapısal birimler arasındaki ilişkiler gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu çalışmanın sonuçlarında da gözlemlendiği üzere genel olarak ahşap yoğunluğunun artmasıyla termal ve mekanik özellik değerlerinde artış gözlenmektedir. Bu durum, termal ve mekanik özellikler arasında belirli bir korelasyon olduğunu düşündürmektedir. Termal ve mekanik özellikler arasındaki bu ilişkinin anlaşılması, ahşap materyallerde tahribatsız mekanik ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesi, kompozit malzemelerin mekanik performanslarının tahmin edilmesi ve ısı işlem ile ahşap modifikasyon tekniklerinin optimizasyonu gibi farklı alanlar için önemli bilgiler

KAYNAKLAR

- Ay, Z. K., Bilgin, F., Gül, A., Gül, M., & Altun, N. (2001). *Tahtalı Barajı koruma alanında kirlenmeyi önleyici alternatif arazi kullanım politikalarının belirlenmesi* (Teknik Rapor No. 4, 70 s.). T.C. Orman Genel Müdürlüğü, Ege Ormancılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü.
- Aliaño-González, M. J., Gabaston, J., Ortiz-Somovilla, V., & Cantos-Villar, E. (2022). Wood waste from fruit trees: Biomolecules and their applications in agri-food industry. *Biomolecules*, 12(2), 238. <https://doi.org/10.3390/biom12020238>
- Aljoumaa, K., Tabeikh, H., & Abboudi, M. (2017). Characterization of apricot kernel shells (*Prunus armeniaca*) by FTIR spectroscopy, DSC and TGA. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 14, 127–132. <https://doi.org/10.1007/s13196-017-0197-7>
- Allouch, D., Popa, M., Popa, V. I., Lisa, G., Puie, A. C., & Nasri, H. (2019). Characterization of components

oluşturmaktadır.

Bu çalışma, tarımsal kökenli odunsu atıkların katma değerli ürünlere dönüştürülmesine ve bu alandaki malzeme mühendisliği yaklaşımlarının geliştirilmesine yönelik veriler sunmaktadır. Elde edilen bulguların, *Prunus* türlerine ait dal odunlarının termal ve mekanik özelliklerinin eşzamanlı olarak incelemesi ile literatüre katkı sağlayacağı ve söz konusu malzemelerin işlevsel ürünlere dönüştürülmesinde izlenecek mühendislik kararlarını destekleyeceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, araştırmanın belirli yetiştirme koşullarındaki örneklerle sınırlı olması, bulguların genellenebilirliğini değerlendirmek amacıyla farklı yetiştirme koşulları ile ek kimyasal ve morfolojik karakterizasyon yöntemlerini içeren daha geniş kapsamlı çalışmaların yapılmasını gerekli kılmaktadır. Bu tür geniş ölçekli araştırmalar ortaya konan potansiyelin daha bütüncül bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır.

Yazar Katkıları

Göksu ŞİRİN: (a) Fikir, (b) Çalışma Tasarısı, Yöntemi, (c) Literatür Taraması, (e) Malzeme, Kaynak Sağlama, (f) Veri Toplama, (g) Veri Analizi, Yorumlama, (h) Metin Yazma

Etik Beyan

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazar çıkar çatışması bildirmemiştir.

isolated from Algerian apricot shells (*Prunus armeniaca* L.). *Cellulose Chemistry and Technology*, 53(9–10), 797–805.

Askeland, D. R., & Fulay, P. P. (2016). *The science and engineering of materials* (7th ed.). Cengage Learning.

Aşıkuzun, E., & Kaymakçı, A. (2018). Investigation of mechanical behavior of wood polymer nanocomposites (WPNs) samples using static Vickers microhardness tester. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 18(1), 62–74. <https://doi.org/10.17475/kastorman.409185>

Aydemir, D., Aksu, O., Bardak, T., Yaman, B., Sözen, E., Yalçın, Ö. Ü., Gündüz, G., & Koçan, N. (2024). Mechanical characterization and strain analysis applied to the heat treatment of wood materials, by means of digital image correlation. *BioResources*, 19(2), 3010–3030. <https://doi.org/10.15376/biores.19.2.3010-3030>

- Beram, A., & Yaşar, S. (2018). NaOH ile modifiye edilmiş kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) yongalarının levha üretimindeki performansı. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 187–196. <https://doi.org/10.29048/makufebed.421675>
- Brebu, M., & Vasile, C. (2010). Thermal degradation of lignin: A review. *Cellulose Chemistry and Technology*, 44(9), 353–363.
- Brostow, W., Menard, K. P., & Menard, N. (2009). Combustion properties of several species of wood. *Chemical Technology*, 3(3), 173–176.
- Chartoff, R. P., & Sircar, A. K. (2002). Thermal analysis of polymers. In H. F. Mark (Ed.), *Encyclopedia of polymer science and technology* (Vol. 13, pp. 385–409). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst367>
- Das, B., Ahmed, N., & Singh, P. (2011). *Prunus* diversity—early and present development: A review. *International Journal of Biodiversity and Conservation*, 3(14), 721–734. <https://doi.org/10.5897/IJBCX11.003>
- Degu, A. M., Hossain, F., Niyogi, D., Pielke Sr., R., Shepherd, J. M., Voisin, N., & Chronis, T. (2011). The influence of large dams on surrounding climate and precipitation patterns. *Geophysical Research Letters*, 38, L04405. <https://doi.org/10.1029/2010GL046482>
- Di Blasi, C., Galgano, A., & Branca, C. (2019). Exothermic events of nut shell and fruit stone pyrolysis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(9), 9035–9049. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01474>
- Ergün, M. E., Toker, H., Baysal, E., & Altay, Ç. (2024). Thermal analysis of oriental beech treated with some dimensional stability chemicals and fire-retardant salts. *Drewno: Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty*, 67(213), 123–138. <https://doi.org/10.53502/wood-189913>
- Esteves, B. M., & Pereira, H. M. (2009). Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*, 4(1), 370–404.
- Gabbott, P. (2008). A practical introduction to differential scanning calorimetry. In *Principles and applications of thermal analysis* (pp. 1–50). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470697702>
- Gao, M., Li, S., & Sun, C. (2004). Thermal degradation of wood in air and nitrogen treated with basic nitrogen compounds and phosphoric acid. *Combustion Science and Technology*, 176(12), 2057–2070. <https://doi.org/10.1080/00102200490514840>
- Gaydarov, V., Soukupova, K., & Zamfirova, G. (2013). Microindentation investigation of balsa wood. *Mechanics-Transport Communications*, 11(3), 0849.
- Gindl, W., Gupta, H. S., Schöberl, T., Lichtenegger, H. C., & Fratzl, P. (2004). Mechanical properties of spruce wood cell walls by nanoindentation. *Applied Physics A*, 79, 2069–2073. <https://doi.org/10.1007/s00339-004-2864-y>
- Golovin, Y. I., Gusev, A. A., Golovin, D. Y., Matveev, S. M., Tyrin, A. I., Samodurov, A. A., Korenkov, V. V., Vasyukova, I. A., & Yunack, M. A. (2023). Multiscale wood micromechanics and size effects study via nanoindentation. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(3), 246–264. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.04.002>
- Govorčin, S., Sinković, T., Sedlar, T., Ištók, I., & Vukadin, M. (2012). Some physical and mechanical properties of plum tree (*Prunus domestica* L.). *Drvna Industrija*, 63(4), 291–295. <https://doi.org/10.5552/drind.2012.1207>
- Gözke, G., & Açıklın, K. (2021). Pyrolysis characteristics and kinetics of sour cherry stalk and flesh via thermogravimetric analysis using isoconversional methods. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 146(2), 893–910. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10612-7>
- Hirata, S., Ohta, M., & Honma, Y. (2001). Hardness distribution on wood surface. *Journal of Wood Science*, 47(1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/BF01165581>
- Ionita, D., Asandulesa, M., & Cristea, M. (2023). Methods for characterization of dielectric and thermal properties of biomaterials. In T. Mohan & K. S. Kleinschek (Eds.), *Functional biomaterials: Design and development for biotechnology, pharmacology, and biomedicine* (Vol. 1, pp. 83–109). Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527827657.ch3>
- ISO. (2019). *International Organization for Standardization 3129:2019, wood—Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests*. <https://www.iso.org/standard/68534.html>
- Janković, B., Manić, N., Dodevski, V., Radojević, M., & Stojiljković, D. (2020). Kinetic study of oxy-combustion of plane tree (*Platanus orientalis*) seeds (PTS) in O₂/Ar atmosphere. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 142(3), 953–976. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09154-z>
- Jeske, H., Schirp, A., & Cornelius, F. (2012). Development of a thermogravimetric analysis (TGA) method for quantitative analysis of wood flour and polypropylene in wood plastic composites (WPC). *Thermochimica Acta*, 543, 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.05.016>
- Jiang, J., Li, J., & Gao, Q. (2015). Effect of flame retardant treatment on dimensional stability and thermal degradation of wood. *Construction and Building Materials*, 75, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.037>
- Kandemir, K., Pişkin, E., Xiao, J., Tomas, M., & Çapanoglu, E. (2022). Fruit juice industry wastes as a source of bioactives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(22), 6805–6832. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c00756>
- Kiaei, M., Tajik, M., & Vaysi, R. (2014). Chemical and biometrical properties of plum woods and its application in pulp and paper production. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 16(3), 312–332. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000024>
- Korshunov, A., Kichatov, B., Sudakov, V., Kolobov, A., Gubernov, V., & Kiverin, A. (2020). Torrefaction of wood in a quiescent layer of talc. *Energy & Fuels*, 34(4), 4660–4669. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b04478>

- Kumar, A., Wang, L., Dzenis, Y. A., Jones, D. D., & Hanna, M. A. (2008). Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock. *Biomass and Bioenergy*, 32(6), 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.11.004>
- Kümmerer, K., Clark, J. H., & Zuin, V. G. (2020). Rethinking chemistry for a circular economy. *Science*, 367(6476), 369–370. <https://doi.org/10.1126/science.aba4979>
- Lam, P. L. (2013). *Development of microencapsulation systems for both oral and topical drug deliveries* [Doctoral dissertation]. University of Nottingham.
- Li, Q., Zhu, F., Shi, F., Zhang, N., & Zhang, H. (2023). Pyrolysis characteristics and kinetics of *Prunus avium* L. leaves using thermogravimetric analysis. *BioResources*, 18(4), 7320–7332. <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.7320-7332>
- Lo Monaco, A., Pelosi, C., Agresti, G., Picchio, R., & Rubino, G. (2020). Influence of thermal treatment on selected properties of chestnut wood and full range of its visual features. *Drewno: Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty*, 63(205), 5–24. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.344.10>
- Mareš, V., & Blahovec, J. (2004). Variation of the tree ring micro-hardness demonstrated on spruce wood. *Journal of Forest Science*, 50(3), 135–141. <https://doi.org/10.17221/3985-JFS>
- Mészáros, E., Jakab, E., & Várhegyi, G. (2007). TG/MS, Py-GC/MS and THM-GC/MS study of the composition and thermal behavior of extractive components of *Robinia pseudoacacia*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79(1–2), 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.12.007>
- MGM. (2025). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, İl ve ilçeler istatistikleri [Web sayfası]. <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx>
- Órfão, J. J. M., Antunes, F. J. A., & Figueiredo, J. L. (1999). Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials—Three independent reactions model. *Fuel*, 78(3), 349–358. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00156-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00156-2)
- Passialis, C. N., & Grigoriou, A. H. (1999). Technical properties of branch-wood of apple, peach, pear, apricot and cherry fruit trees. *Holz als Roh - Werkstoff*, 57(1), 41–44. <https://doi.org/10.1007/s001070050383>
- Perçin, O., Peker, H., & Atilgan, A. (2016). The effect of heat treatment on some physical and mechanical properties of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) wood. *Wood Research*, 61(3), 443–456.
- Polanco, J. D., Jacanamejoy-Jamioy, C., Mambuscay, C. L., Piamba, J. F., & Forero, M. G. (2022). Automatic method for Vickers hardness estimation by image processing. *Journal of Imaging*, 9(1), 8. <https://doi.org/10.3390/jimaging9010008>
- Poletto, M., Zattera, A. J., Forte, M. M., & Santana, R. M. (2012). Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size. *Bioresource Technology*, 109, 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.122>
- Potter, D. (2010). *Prunus*. In C. Kole (Ed.), *Wild crop relatives: Genomic and breeding resources: Temperate fruits* (pp. 129–145). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16057-8_7
- Protásio, T. P., Junior, M. G., Mirmehdi, S., Trugilho, P. F., Napoli, A., & Knovack, K. M. (2017). Combustion of biomass and charcoal made from babassu nutshell. *CERNE*, 23(1), 1–10. <https://doi.org/10.1590/010477602017230112202>
- Popescu, M. C., Popescu, C. M., Lisa, G., & Sakata, Y. (2011). Evaluation of morphological and chemical aspects of different wood species by spectroscopy and thermal methods. *Journal of Molecular Structure*, 988(1–3), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.12.004>
- Ramazanoğlu, D., & Özdemir, F. (2023). Treatment of *Fagus orientalis* surface by ZnO/TiO₂/FAS-17-based nanoparticles. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 23(3), 175–185. <https://doi.org/10.17475/kastorman.1394874>
- Rubino, G., Lo Monaco, A., Lanteri, L., & Pelosi, C. (2023). Improving the technical characteristics of untreated and heat-treated ayous wood against accelerating ageing by testing two application modalities of an innovative polyurethane coating for outdoor uses. *Coatings*, 13(8), 1312. <https://doi.org/10.3390/coatings13081312>
- Safi, M. J., Mishra, I. M., & Prasad, B. (2004). Global degradation kinetics of pine needles in air. *Thermochimica Acta*, 412(1–2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2003.09.017>
- Sandberg, D., Haller, P., & Navi, P. (2013). Thermo-hydro and thermohydromechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science & Engineering*, 8(1), 64–88. <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.751935>
- Sebio-Puñal, T., Naya, S., López-Beceiro, J., Tarrío-Saavedra, J., & Artiaga, R. (2012). Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(3), 1163–1167. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-2133-1>
- Shapchenkova, O., Loskutov, S., Aniskina, A., Börcsök, Z., & Pásztor, Z. (2022). Thermal characterization of wood of nine European tree species: Thermogravimetry and differential scanning calorimetry in an air atmosphere. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(2), 409–417. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01763-6>
- Sharma, A., & Mohanty, B. (2021). Thermal degradation of mango (*Mangifera indica*) wood sawdust in a nitrogen environment: Characterization, kinetics, reaction mechanism, and thermodynamic analysis. *RSC Advances*, 11, 13396–13408. <https://doi.org/10.1039/d0ra08881k>
- Söğütlü, C., Nzokou, P., Koç, I., Tutgun, R., & Döngel, N. (2016). The effects of surface roughness on varnish adhesion strength of wood materials. *Journal of*

- Coatings Technology and Research*, 13(5), 863–870. <https://doi.org/10.1007/s11998-016-9805-5>
- Sydor, M., Pinkowski, G., Kučerka, M., Kminiak, R., Antov, P., & Rogoziński, T. (2022). Indentation hardness and elastic recovery of some hardwood species. *Applied Sciences*, 12(10), 5049. <https://doi.org/10.3390/app12105049>
- Şahin, C. K., & Onay, B. (2020). Alternative wood species for playgrounds: Wood from fruit trees. *Wood Research*, 65(1), 149–160.
- Todaro, L., Rita, A., Pucciariello, R., Mecca, M., & Hızıroğlu, S. (2018). Influence of thermo-vacuum treatment on thermal degradation of various wood species. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76, 541–547. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1230-7>
- TSE. (2023). Türk Standartları Enstitüsü ISO 6507-1: *Metalik malzemeler – Vickers sertlik deneyi – Bölüm 1: Deney yöntemi (ISO 6507-1:2023)*. Ankara: TSE Yayınları.
- Urruzola, I., Robles, E., Serrano, L., & Labidi, J. (2014). Nanopaper from almond (*Prunus dulcis*) shell. *Cellulose*, 21, 1619–1629. <https://doi.org/10.1007/s10570-014-0238-y>
- Üner, İ. H., Deveci, İ., Baysal, E., Türkoğlu, T., Toker, H., & Peker, H. (2016). Thermal analysis of oriental beech wood treated with some borates as fire retardants. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 18(2), 293–304. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000027>
- Vargun, E., Baysal, E., Türkoğlu, T., Yüksel, M., & Toker, H. (2019). Thermal degradation of oriental beech wood impregnated with different inorganic salts. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 21(2), 163–170. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000204>
- Velázquez-Martí, B., Fernández-González, E., López-Cortés, I., & Salazar-Hernández, D. M. (2011). Quantification of the residual biomass obtained from pruning of trees in Mediterranean olive groves. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3208–3217. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.042>
- Wiemann, M. C., & Green, D. W. (2007). *Estimating Janka hardness from specific gravity for tropical and temperate species* (USDA Forest Service FPL-RP-643) [Technical report]. Forest Products Laboratory.
- Winzer, F., Kraska, T., Elsenberger, C., Kötter, T., & Pude, R. (2017). Biomass from fruit trees for combined energy and food production. *Biomass and Bioenergy*, 107, 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.001>
- WSL. (2025). *Vickers hardness testing*. <https://www.hardnessgauge.com/testing-types/vickers-hardness-testing>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Vigneron, A., Jehan, C., Rigaud, T., & Moret, Y. (2019). Immune defenses of a beneficial pest: The mealworm beetle, *Tenebrio molitor*. *Frontiers in Physiology*, 10, 138. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00138>
- Xiong, Y., Fang, J., Zeng, Q. H., & Liu, Q. L. (2008). Preparation and characterization of cross-linked quaternized poly(vinyl alcohol) membranes for anion exchange membrane fuel cells. *Journal of Membrane Science*, 311(1–2), 319–325. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.12.029>
- Zhang, H., Lu, X., Zhang, Y., Ma, X., Wang, S., Ni, Y., & Chen, J. (2016). Bioaccumulation of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls by loaches living in rice paddy fields of Northeast China. *Environmental Pollution*, 216, 893–901. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.064>
- Zimmermann, G. (2007). Review on safety of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Beauveria brongniartii*. *Biocontrol Science and Technology*, 17(6), 553–596. <https://doi.org/10.1080/09583150701309006>
- Zor, M., Şen, F., Candan, Z., Ivanov, E., Batakliov, T., Georgiev, V., & Menseidov, D. (2024). Preparation and characterization of polyvinyl alcohol (PVA)/carbonized waste rubber biocomposite films. *Polymers*, 16(8), 1050. <https://doi.org/10.3390/polym16081050>