Ormancılık Araştırma Dergisi
Turkish Journal of Forestry Research
2026, 13:1, 109-124

DOI: https://doi.org/10.17568/ogmoad.1896824
Orman Ürünleri/Forest Products
Araştırma makalesi/Research article

Aksöğütün (*Salix alba* L.) budanmış dal odunu artıklarının teknik özellikleri ve biyomalzeme potansiyeli

Technical properties and biomaterial potential of pruned branch wood residues of White willow (*Salix alba* L.)

Göksu Şirin[1]

[1] Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat

Sorumlu yazar (*Corresponding author***)**
Göksu Şirin
goksusirin@gmail.com

Geliş tarihi *(Received)*
24.02.2026
Kabul Tarihi *(Accepted)*
20.05.2026

Sorumlu editör (*Corresponding editor***)**
Deniz Aydemir
denizaydemir@bartin.edu.tr

Atıf *(To cite this article)***:** Şirin, G. (t.y.). Aksöğütün (Salix alba L.) budanmış dal odunu artıklarının teknik özellikleri ve biyomalzeme potansiyeli. Ormancılık Araştırma Dergisi, 13(1), 109-124. DOI: https://doi.org/10.17568/ogmoad.1896824

Creative Commons Atıf - Türetilemez 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.

Öz

Çalışmada, budama artığı niteliğindeki aksöğüt (*Salix alba* L.) dal odununun morfolojik, termal, kristalin ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir. 2 yıl süresince açık hava koşullarında toprakla temas halinde bırakılan materyalde yapılan taramalı elektron mikroskobu analizleri, temel anatomik yapının büyük oranda korunduğunu, ancak hücre çeperlerinde lokal morfolojik deformasyonlar geliştiğini ortaya koymuştur. Termogravimetrik verilere göre, örnek tipik üç aşamalı lignoselüloz bozunma profili sergilemiş ve DTG eğrisinde 380,8 °C'de maksimum bozunma tepe noktası gözlemlenmiş ve 800 °C'deki kalıntı kütle oranı %16,2 olarak hesaplanmıştır. X-ışını kırınım bulguları, karakteristik selüloz tepe noktalarını doğrulamış ve kristalinite indeksi %43,6 olarak belirlenmiştir. Vickers mikrosertlik testlerinde lif yönüne paralel ortalama değerler 100 ± 6 MPa, lif yönüne dik değerler ise 67 ± 3 MPa olarak ölçülmüş, yönlenmeye bağlı mekanik anizotropi açık biçimde izlenmiştir. Bulgular, aksöğüt dal odununun termokimyasal kararlılığı ile kristalin organizasyonu arasında tutarlı bir ilişkinin bulunduğunu ve budama artıklarının yalnızca enerji biyokütlesi olarak değil, biyomalzeme ve mühendislik temelli uygulamalarda da değerlendirilebilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Çalışma, dal artıklarının sürdürülebilir ve katma değerli kullanımına yönelik deneysel verileri sunmaktadır.

***Anahtar Kelimeler*:** Lignoselülozik atık, taramalı elektron mikroskobu, termogravimetrik analiz, X-ışını kırınımı, Vickers mikrosertlik

Abstract

In this study, the morphological, thermal, crystalline, and mechanical properties of pruned branch wood of White willow (*Salix alba* L.) were characterized. The material, which was left in contact with soil under open-air conditions for 2 years, was examined by scanning electron microscopy, revealing that the fundamental anatomical structure was largely preserved, although local morphological deformations developed in the cell walls. According to thermogravimetric data, the sample exhibited a typical three-stage lignocellulosic degradation profile, with a maximum degradation peak observed at 380.8 °C in the DTG curve. The residual mass fraction at 800 °C was calculated as 16.2%. X-ray diffraction results confirmed the characteristic cellulose peaks, and the crystallinity index was determined to be 43.6%. In Vickers microhardness tests, the average values were measured as 100 ± 6 MPa parallel to the grain and 67 ± 3 MPa perpendicular to the grain, clearly indicating orientation-dependent mechanical anisotropy. The findings demonstrate a consistent relationship between the thermochemical stability and crystalline organization of White willow branch wood and suggest that pruning residues possess potential not only as energy biomass but also for biomaterial and engineering-based applications. This study provides experimental data supporting the sustainable and value-added utilization of branch residues.

***Keywords*:** Lignocellulosic biomass, scanning electron microscopy, thermogravimetric analysis, X-ray diffraction, Vickers microhardness

1. Giriş

Malzeme bilimi ve mühendisliği, günümüzde üstün performans, yüksek verimlilik ve çevresel sürdürülebilirliği eş zamanlı olarak sağlayabilen yeni nesil ürünlerin geliştirilmesine odaklanmaktadır (Beims ve ark., 2022). Özellikle, odun türevli lignoselülozik malzemeler, yenilenebilir kaynaklar olmaları ve çok yönlü kullanım olanakları sayesinde öne çıkmaktadır. Ayrıca, biyoteknoloji, biyomühendislik ve biyoekonomi (Auriga ve ark., 2022) gibi disiplinlerle yüksek entegrasyon potansiyeline sahip olmaları, bu malzemeleri güçlü bir alternatif haline getirmektedir (Schubert ve ark., 2022). Odunun mikrodan makroya uzanan çok ölçekli hiyerarşik organizasyonu, sentetik olarak yeniden üretimi güç olan özgün bir yapısal mimari sergilemekte ve ileri malzeme tasarımı ile nanoteknoloji uygulamaları için güçlü bir biyomimetik model sunmaktadır (Beims ve ark., 2022).

Diğer taraftan, belirli coğrafi bölgelerde ve iklim koşullarında yetişen lignoselülozik hammaddelerin yanı sıra, ahşap endüstrisi süreçlerinden elde edilen yan ürün ve artıkların katma değerli uygulamalara yönlendirilmesi, sürdürülebilir kaynak yönetimi açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Pędzik ve ark., 2022). Biyotabanlı ürün geliştirme yaklaşımları doğrultusunda, odunsu biyokütlenin farklı fraksiyonlarının endüstriyel sistemlere dahil edilmesi, malzeme performansının optimize edilmesine olanak sağlamaktadır (Leitch ve Miller, 2017; Dadzie ve ark., 2018; Chen ve ark., 2020).

Son yıllarda araştırmalar, ana gövdeye ek olarak dal odununa da yönelmiştir. Ormancılık faaliyetleri ve ağaç işleme süreçlerinde ortaya çıkan dal artıkları, biyotabanlı malzeme uygulamaları açısından dikkat çekici bir hammadde kaynağıdır (Okai ve Boateng, 2007; Kučerová ve Výbohová, 2014). Nitekim, dal odununun üretim süreçlerine dahil edilmesinin toplam hammadde verimliliğini yaklaşık %60 oranında artırdığı ve birim orman alanından elde edilen kullanılabilir lif miktarını anlamlı düzeyde yükselttiği rapor edilmiştir (Shmulsky ve Jones, 2011; Ihnát ve ark., 2021). Bununla beraber, dal odununun teknik ve endüstriyel açıdan etkin kullanımın sağlanabilmesi için mevcut işleme teknolojileri ve üretim proseslerinin bu malzemenin yapısal özelliklerine uyumlu şekilde yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir (Wronka ve ark., 2025).

Gövde odununa kıyasla daha heterojen bir yapı sergileyen dal odunu, yüksek değişkenliği nedeniyle analiz edilmesi ve işlenmesi güç bir malzeme olarak kabul edilmektedir (Moreira ve ark., 2022; Nenning ve ark., 2024). Dal odunu, ağacın biyolojik yaşam döngüsü boyunca maruz kaldığı yerçekimi, rüzgâr yükleri ve hidrolik kısıtlar gibi çevresel stresler nedeniyle, gövde odunundan belirgin şekilde ayrılan özelleşmiş bir doku anatomisini geliştirmektedir. Bu dinamik yüklemelere karşı geliştirilen bir direnç mekanizması olarak dallar, genellikle daha yüksek yoğunluk sergilemekte ve yoğun miktarda reaksiyon odunu formasyonunu içermektedir (Gartner, 1995; Tyree ve Zimmermann, 2002; Hagel ve ark., 2021). Anatomik düzeydeki bu farklılıklar, odun kesildikten sonra malzemenin çevresel streslere verdiği tepkiyi ve fiziksel bozunma biçimini de temelden etkilemektedir. Yine gövde odununa kıyasla dal odunu, kesim sonrası kuruma aşamasında daha yüksek çatlama riski, artan boyuna büzülme oranları ve reaksiyon odunundaki iç gerilmelerin boşalması nedeniyle daha farklı bir deformasyon eğilimi gösterebilmektedir (Sharma ve Altaner, 2014; Dadzie ve ark., 2018; Moreira ve ark., 2022; Van Rooij ve ark., 2023).

Günümüzde ormancılık ve çeşitli ağaç işleme faaliyetleri sonucunda açığa çıkan dal odunu biyokütlesi genellikle açık alanda yakılmakta (Picchi ve ark., 2018) veya arazi yüzeyinde çürümeye terk edilmektedir (Manzone ve ark., 2019). Aynı zamanda bu materyalin sahip olduğu yüksek doğal dayanıklılık, doğada uzun süre bozunmadan kalmasına ve ciddi birikimlere yol açmaktadır (Moreira ve ark., 2022). Dolayısıyla uygulanan geleneksel yöntemler yalnızca çevresel ve ekonomik kayıplar oluşturmakla kalmayıp, söz konusu lignoselülozik kaynağın katma değerli bir biyomateryal olma potansiyeli açısından zayıf sonuçlar vermektedir (Picchi ve ark., 2018).

Salicaceae familyası, *Salix* cinsine ait aksöğüt (*Salix alba*), kısa rotasyon döngüsü, yüksek sürgün kapasitesi ve kayda değer dal biyokütlesi üretimiyle karakterize edilen bir türdür (Wilkinson ve ark., 2007; Amichev ve ark., 2011; Almuktar ve ark., 2024). Tarih boyunca Antarktika hariç tüm kıtalarda yaygın küresel dağılımı ile insanlık için önemli bir bitki olmuştur (Argus, 2010; Baker ve ark., 2022). Değişken iklim ve toprak koşulları ile hastalıklara karşı yüksek tolerans gösterebilmektedir (Paray ve ark., 2017; Wagner ve ark., 2021; Rotherham, 2022; Baker ve ark., 2022). Deniz seviyesinden 2400 m'ye kadar yayılış gösterebilen aksöğüt, çoğunlukla nehir ve göl kıyıları gibi suya yakın alanlarda bulunmaktadır (Bajraktari ve ark., 2022). Bununla beraber çelikleme yoluyla kolayca yetiştirilebilir (Andleeb ve ark., 2018). Doğal koşullarda 30 m'ye kadar boya ve 1 m çapa ulaşabilen (Isebrands ve ark., 2014; Bajraktari ve ark., 2022) bu türün ortalama yaşam süresi 30 yıl civarındadır

(Praciak ve ark., 2013; Kaya ve ark., 2024). Geniş, ancak seyrek yapılı bir tepeye sahip olan türün (Paray ve ark., 2017) odunu, açık renkli, düşük yoğunluklu, yumuşak, düzgün dokulu, dayanıklı ve elastik yapılıdır (Kaya ve ark., 2024).

Aksöğüt, sahip olduğu potansiyel ve ekonomik değer nedeniyle platin bitkisi olarak da nitelendirilmektedir (Andleeb ve ark., 2018). Tesis edilen bir söğüt ağaçlandırmasında, yeniden dikim gerektirmeden 25 yıl boyunca, her üç yılda bir üretim (kesim) yapılarak 8-9 rotasyon sağlanabilmekte (Volk ve ark., 2004; Karp ve Shield, 2008; Sleight ve ark., 2016; Baker ve ark., 2022) ve yüksek miktarda dal biyokütlesi üretilebilmektedir (Kuzovkina ve ark., 2007; Değirmenci, 2017). Bu tür, a) İlaç sanayii (Desborough ve Keeling, 2017; Malik ve ark., 2020), b) Selüloz ve kâğıt endüstrisi, c) İnşaat uygulamaları (Kaya ve ark., 2024; Andrei ve ark., 2024), d) El sanatları, e) Kibrit üretimi, f) Levha endüstrisi, g) Hayvan yemi ve h) Biyoenerji üretimi (Bhat ve ark., 2019; Bakšienė ve Titova, 2018; Baker ve ark., 2022; Andrei ve ark., 2024) gibi alanlarda hammadde kaynağı olarak kullanılırken, i) Esnek dal yapıları sayesinde sepetçilik gibi geleneksel uygulamalarda da değerlendirilmektedir (Andrei ve ark., 2024).

Aksöğüte ilişkin literatür geniş olmakla birlikte, dal odununun malzeme özelliklerini inceleyen araştırmalar ise sınırlıdır. Arıhan ve Köroğlu (2011), Ankara ilinde yetişen aksöğüt ve diğer *Salix* taksonlarının gövde anatomik özelliklerini incelemişlerdir. Dönmez ve Salman (2021), Göller Bölgesi'nde doğal olarak yetişen aksöğüt odununun ve kabuğunun kimyasal yapısını; Kaya ve ark. (2024) ise türün öz ve diri odununun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Ihnát ve ark. (2021), aksöğütü de kapsayan çeşitli sert (yapraklı) ağaç türlerinin dal odunlarındaki kimyasal bileşenleri ve lif özelliklerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Cobas ve Tortoriello (2024), *S. babylonica* x *S. alba* melezine ait Ragonese 131-27 genotipinin teknolojik karakterizasyonunu incelemiştir. Gupta ve ark. (2014), Avrupa ve Türkiye kaynaklı örnekleri çalışarak, Türkiye kökenli aksöğüt örneklerinin odun yoğunluğu ve lif uzunluğu açısından öne çıktığını belirtmişlerdir. Stolarski ve ark. (2024) ise aksöğütün ve bazı kısa rotasyonlu bitkilerin kabuk soyma artıklarından elde edilen odunlarının kullanım özelliklerini araştırmışlardır.

Bu çalışmada, doğal ortam koşullarında 2 yıl süreyle beklemiş aksöğüt dal odunu kullanılmıştır. Materyal, doğal bozunma süreçlerine maruz kalmış lignoselülozik biyokütleyi temsil etmek ve bu süreçte meydana gelen kimyasal, morfolojik ve mikroyapısal değişimlerin malzeme davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla tercih edilmiştir. Araştırmanın amacı, gerçek saha koşullarında biriken düşük değerli dal artıklarının katma değerli biyomalzeme girdisi olarak potansiyel kullanım alanlarını bilimsel verilerle değerlendirmektir. Ahşap yüzeylerin tanımlanması, anatomik ve yapısal değişimlerin çok yönlü analizini gerektirmektedir (Balzano ve ark., 2022). Bu kapsamda çalışmada, morfolojik yapı taramalı elektron mikroskobu (SEM), kristalinite değeri X-ışını kırınımı (XRD), termal davranışlar termogravimetrik analiz (TGA) ve mikromekanik özellikler Vickers sertlik testi ile detaylandırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada kullanılan aksöğütün dal odunu örneği (çap: 3,1 cm), Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Ankara ilinin güneybatısındaki bir alandan (39°44′02′′ K; 32°32′30′′ D; rakım: 1153 m) temin edilmiştir (Şekil 1). Örnekleme alanında, yaz aylarının sıcak ve kurak, kış aylarının ise soğuk ve kar yağışlı geçtiği ve periyodik olarak kuvvetli rüzgârların etkili olduğu tipik yarı kurak karasal iklim koşulları hâkimdir. Meteorolojik verilere göre yörenin yıllık ortalama sıcaklığı 12°C ve yıllık toplam yağışı yaklaşık 392 mm'dir (MGM, 2025).



Şekil 1. Deneylerde kullanılan aksöğüt dal odunu örneğinin genel görünümü
Figure 1. General view of the White willow branch wood sample used in the experiments

Deney materyali, doğal bozunma sürecini simüle etmek amacıyla, kabuklu halde 2 yıl süreyle, doğrudan toprak yüzeyi üzerinde ve günün büyük bölümü gölge alan bir yerde dış hava koşulları etkisinde bırakılmıştır. Bu süre boyunca örnek, çevresel koşullara bağlı olarak tekrarlayan ıslanma-kuruma ve donma-çözünme döngülerine maruz kalmıştır. Bu çevresel etkiler, odunun dokusunda belirgin higrotermal gerilmelere ve yapısal değişimlere neden olabilecek niteliktedir.

Odun yapısındaki değişimlerin homojen değerlendirilebilmesi ve varyasyonun minimize edilmesi

için, tüm analiz örnekleri aynı ağacın tek bir dalından hazırlanmıştır. Deney numuneleri hazırlanırken, budaksız, lif yönelimi düzgün ve herhangi bir yapısal kusur içermeyen odun kısımları seçilmiştir. Tüm örnekler karakteristik özelliklerin daha belirgin olduğu diri odun bölgelerinden kesilerek elde edilmiştir.

Taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınımı ve termogravimetrik analizler Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Vickers sertlik testleri Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

2.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz

Söğüt dal odununun mikroyapısında meydana gelebilecek morfolojik değişimleri ve yapısal hasar belirtilerini incelemek amacıyla SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için kabuklarından arındırılmış dal odunu örneklerinin öze yakın bölgelerinden yaklaşık 1 cm^3 boyutlarında 5 adet küp numune hazırlanmıştır. Bu numuneler, kesit alma sırasında hücre yapısında oluşabilecek mekanik hasarları önlemek amacıyla, doygunluğa ulaşana kadar damıtılmış suda (distile su) kaynatılarak yumuşatılmıştır. Ardından, hücre duvarının bütünlüğü korunarak serbest suyun uzaklaştırılması (dehidrasyon) amacıyla mutlak etil alkol içerisinde 20 gün bekletilmiştir (Berlyn ve Miksche, 1976).

Dehidrasyon süreci tamamlanan numunelerin enine, radyal ve teğet yüzeylerinden Reichert sürgülü mikrotom kullanılarak yaklaşık 20 µm kalınlığında kesitler alınmıştır. Bu kesitler, elektriksel iletkenliği sağlamak ve görüntüleme sırasında oluşabilecek yüklenme artefaktlarını önlemek için sputter kaplama cihazı ile vakum altında %60 altın (Au)- %40 paladyum (Pd) alaşımıyla yaklaşık 10 nm kalınlığında kaplanmıştır. Mikroyapısal incelemeler, TESCAN MAIA3-XMU cihazında, 10 kV hızlandırma voltajı altında ve yüzey topografisine duyarlı ikincil elektron dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.2. Termogravimetrik analiz (TGA)

Numunelerin termal bozunma davranışları ve kararlılık özellikleri, Perkin Elmer (TG/DTA) cihazı kullanılarak TGA ve türevli termogravimetrik analiz (DTG) yöntemleriyle incelenmiştir. Analizlerde yaklaşık 2,5 mg ağırlığında numune, referans olarak boş bir potanın kullanıldığı sistemde yüksek sıcaklığa dayanıklı alüminyum oksit (Al_2O_3) potalar içerisine yerleştirilmiştir.

Termal bozunma süreci, oksidatif reaksiyonların önlenmesi ve sadece pirolitik ayrışmanın izlenebilmesi amacıyla, 100 $mL \cdot dk^{-1}$ akış hızına sahip azot (N_2) atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık programı, ortam sıcaklığından (25°C) 810°C'ye kadar 20°C·dk^{-1} sabit ısıtma hızı uygulanarak tamamlanmıştır. Elde edilen TGA termogramları üzerinden kütle kayıpları ve nihai kalıntı miktarları hesaplanmıştır. TGA verilerinin zamana/sıcaklığa göre türevi alınarak oluşturulan DTG eğrileri ise odun bileşenlerini oluşturan hemiselüloz, selüloz ve lignin polimerlerinin termal ayrışma aşamalarını ve maksimum bozunma sıcaklıklarını (T_{max}) belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

2.3. X-ışını kırınımı analizi (XRD)

Selülozun kristal yapısındaki olası değişimlerin ve kristalinite indeksinin (CrI) belirlenmesi amacıyla, yaklaşık 0,5 mm boyutunda partiküllere sahip 2 gr numune kullanılmıştır. Difraksiyon ölçümleri sırasında serbest suyun pik profilleri ve arka plan sinyali üzerindeki etkisini minimize etmek için örnekler, 103± 2°C'de sabit kütleye ulaşıncaya kadar kurutulmuş ve analiz anına kadar desikatörde muhafaza edilmiştir.

XRD ölçümleri, Rigaku SmartLab difraktometresi kullanılarak 40 kV çalışma gerilimi ve 30 mA akım değerleri altında gerçekleştirilmiştir. Tarama işlemleri 2θ = 5°-80° aralığında, 0,04° adım aralığı ve 3°·dk^{-1} tarama hızıyla yürütülmüştür. Işınım kaynağı olarak CuKα radyasyonu (λ= 1,5418 Å) tercih edilmiş, CuKβ ışınımının spektruma etkisini azaltmak amacıyla nikel (Ni) filtre kullanılmıştır.

Selülozun CrI değeri, Segal ve ark. (1959) tarafından önerilen yöntemle hesaplanmıştır. Yöntemde, kristalin düzlemi temsil eden (200) düzlemindeki maksimum difraksiyon şiddeti (I_{200}) ile amorf bölgeyi temsil eden 2θ≈ 18° konumundaki minimum şiddet değeri (I_{amorf}) kullanılarak ve Eşitlik 1 yardımıyla hesaplama yapılmıştır:

$$CrI(\%) = \frac{I_{200} - I_{amorf}}{I_{200}} \times 100 \qquad (1)$$

2.4. Mikro yüzey sertliği analizi

Dal odunu örneklerinin sınırlı kesit boyutlarına sahip olması nedeniyle, küçük boyutlu numunelerde hassas ölçüm imkânını sağlayan Vickers mikro sertlik yöntemi tercih edilmiştir. Ölçümler, liflere paralel ve liflere dik doğrultularda hazırlanan yüzeylerin üzerinde gerçekleştirilmiştir. 5×5×10 mm boyutunda hazırlanan 5 parça numune, test öncesinde akrilik esaslı bir reçine ile soğuk kalıplama yöntemi kullanılarak stabilize edilmiş ve reçine

yeterli sertliğe ulaştıktan sonra yüzey parlatma işlemine alınmıştır. Optik mikroskop altında iz (indentasyon) ölçümlerinin hatasız yapılabilmesi amacıyla bu yüzeyler 400 ile 4000 grit aralığında değişen kademeli zımparalar kullanılarak parlatılmıştır.

Mikrosertlik testleri, Vickers indenter kullanılarak Highwood HWDM-3 mikrosertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deney prosedürü, TS EN ISO 6507-1 (2023) standardında tanımlanan Vickers test prensipleri esas alınarak yürütülmüştür. Ölçümler sırasında, 136° yüz açısına sahip kare tabanlı elmas piramit uç kullanılmış ve numune yüzeyine 25 g statik yük 10 s süreyle uygulanmıştır. Her bir ölçüm yönü için 10 farklı noktadan indente işlemi gerçekleştirilmiştir.

Oluşan izlerin iki köşegen uzunluğu cihazın entegre optik sistemi ile ölçülmüş ve Vickers mikrosertlik değerleri (HV) cihaz yazılımı tarafından otomatik olarak Eşitlik 2 ile hesaplanmıştır. Elde edilen sertlik değerleri, 1 HV= 9,807 MPa dönüşüm katsayısı kullanılarak megapaskal (MPa) birimine dönüştürülmüş ve ortalama değerler halinde sunulmuştur.

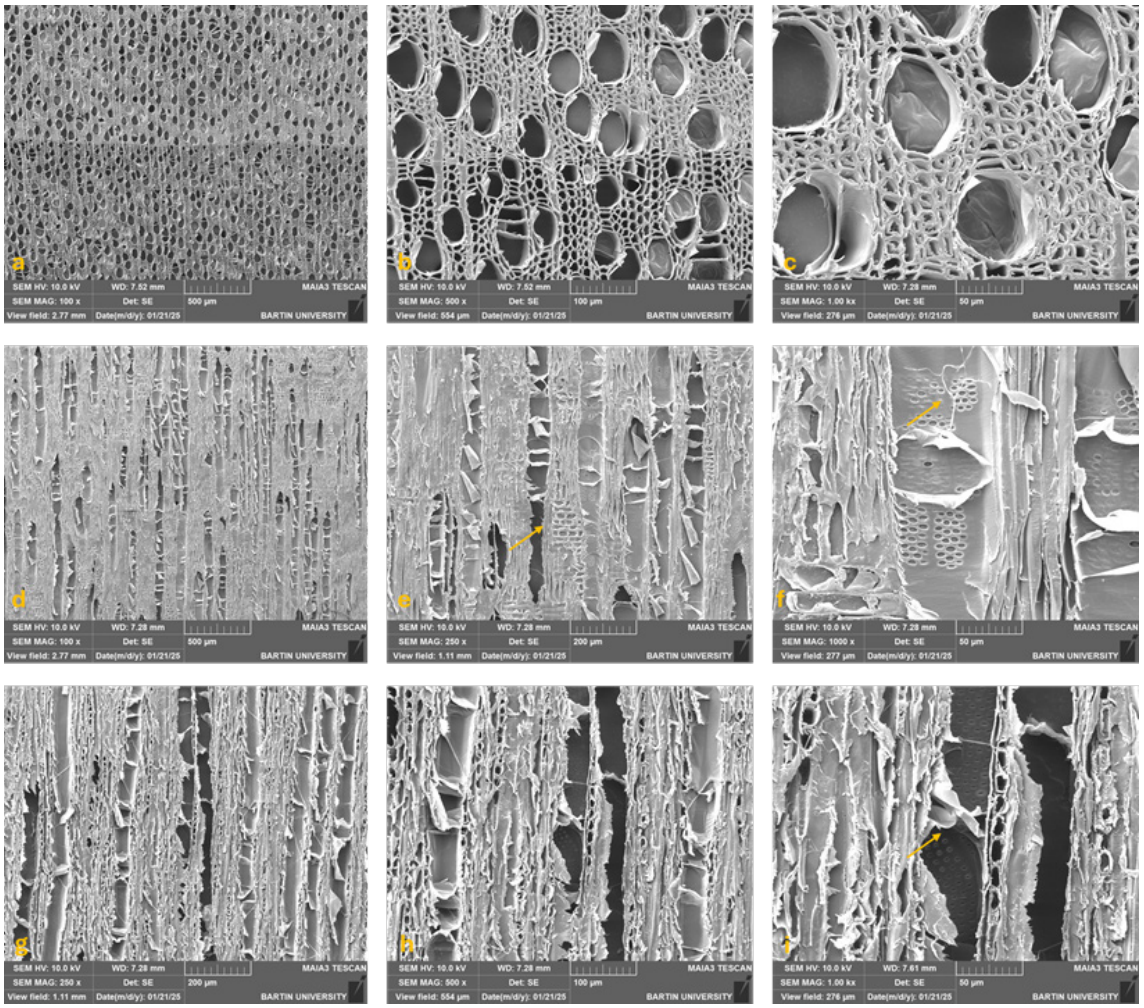
$$HV = 1854{,}4\,\frac{F}{d^2} \qquad (2)$$

Burada; HV, Vickers sertliğini (kgf·mm^{-2}); 1854,4, elmas ucun tepe açısına (136°) bağlı geometrik sabiti, F, uygulanan statik yükü (gf), d, iz üzerinde ölçülen iki köşegenin (d_1 ve d_2) aritmetik ortalamasını (µm) ifade etmektedir.

3. Bulgular

3.1. Mikroyapısal karakterizasyon

Aksöğütün dal odununa ait SEM analizleri için hazırlanan ve yumuşatma işlemi uygulanan numunelerde, mikrotom ile kesit alma sürecinde doku bütünlüğü korunmuş ve anatomik yapılarında her-



Şekil 2. Aksöğüt ağacının dal odununa ait SEM görüntüleri: a-c) Enine kesit, d-f) Radyal kesit, g-i) Teğet kesit
Figure 2. SEM images of branch wood of White willow: a-c) Transverse section, d-f) Radial section, g-i) Tangential section

hangi bir parçalanma gözlenmemiştir.

Enine kesitin SEM mikrograflarında (Şekil 2a-2c), türe özgü dağınık gözenekli yapı net bir şekilde izlenmektedir. Trahe elemanlarının kesitin genelinde homojen bir dağılım sergilediği, yıllık halka sınırlarının ise belirgin olmadığı görülmektedir. Traheler oval-eliptik formda olup çoğunlukla tekli veya ikili-üçlü kısa radyal diziler halinde gruplanmıştır. Trahe, parankima ve lif hücrelerinin temel morfolojik özellikleri korunmuş olmakla birlikte, bazı trahe lümenlerinde mikrotom kesimine bağlı yüzey kıvrımlanmaları ve ince membran benzeri yapılar tespit edilmiştir. Bazı trahelerin iç boşluklarında ise lümeni kısmen veya tamamen dolduran tiloz morfolojisi gösteren oluşumlar dikkati çekmektedir.

Lif hücrelerinin özellikle köşe birleşim bölgelerinde duvar sürekliliği yer yer bozulmuş, düzensiz mikro boşluklar ve lokal morfolojik deformasyonlar oluşmuştur. Buna karşın, lif-lif ve lif-trahe arayüzlerinde bütünlük genel olarak korunmuş ve geniş ölçekli tabakalar arası ayrılmalar izlenmemiştir. Lif hücrelerinin lümen çeperinin iç kısmında jelatinimsi tabaka benzeri yapılar görülmektedir.

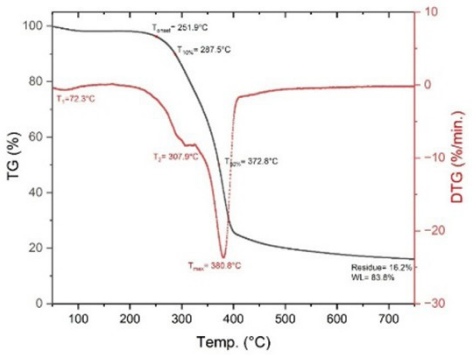
Radyal kesitin mikrograflarında (Şekil 2d-2f) hücrelerin genel dizilimi düzenli olup öz ışını parankima hücrelerinin karakteristik köşeli geometrisi büyük oranda korunmuştur. Ancak bazı bölgelerde hücre duvarlarında yüzey düzensizlikleri ve lokal deformasyonlar tespit edilmiştir. Şekil 1f'de trahe elemanlarının çeperlerinde yer alan kenarlı geçit alanları boyunca ilerleyen mantar hifleri izlenmektedir.

Teğet kesitin mikrograflarında (Şekil 2g-2i), trahe elemanlarının libriform lif matrisi içerisinde homojen bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Parankima hücrelerinin oluşturduğu öz ışınlarının morfolojik sınırları genel olarak seçilebilmekle birlikte, bazı bölgelerde hücre çeperlerindeki deformasyon ve heterojenlik nedeniyle dizilimin netliği azalmış ve lif-parankima ayrımı güçleşmiştir. Trahelerin yan çeperlerinde bulunan geçit yapılarını genel morfolojilerini korumuş, geçit açıklıklarında belirgin bir genişleme veya yapısal bozulma meydana gelmemiştir.

3.2. Termal analiz bulguları

Dal odununa ait TGA ve DTG eğrileri (Şekil 3), lignoselülozik biyokütleler için karakteristik olan çok aşamalı bir termal bozunma davranışını sergilemiştir.

Termogramın başlangıç evresinde, yaklaşık 150°C'ye kadar kaydedilen kütle kaybı, odun yapısındaki serbest ve bağlı su ile düşük moleküler ağırlıklı uçucu özüt maddelerinin uzaklaşmasına atfedilmektedir (Marková ve ark., 2018; Aydemir ve ark., 2024). Bu dehidrasyon aşamasında DTG profilinde T_1= 72,3°C civarında zayıf bir sapma gözlenmiştir. Belirgin bir pik oluşmaması, söz konusu kütle kaybının kimyasal bir ayrışmadan ziyade fiziksel dehidrasyon karakterinde olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 3. Aksöğütün dal odunu TGA/DTG termogramları
Figure 3. TGA/DTG thermograms of White willow branch wood

Biyokütlenin ana polimerik bileşenlerinin ayrıştığı ve toplam kütle kaybının büyük bölümünün meydana geldiği aktif piroliz evresi, literatürde hemiselülozlar için genellikle 150-350°C, selüloz içinse 240-400°C aralıklarında rapor edilmektedir. Lignin fraksiyonu ise aromatik ve kompleks yapısı nedeniyle 200-500°C gibi daha geniş bir sıcaklık aralığında, kademeli ve diğer bileşenlerle örtüşen bir bozunma davranışını sergilemektedir (Thurner ve Mann, 1981; Mészáros ve ark., 2007; Aydemir ve ark., 2024). Çalışmamızda aksöğütün dal odunu numunesinde bu evre, T_{onset} = 251,9°C itibariyle başlayarak 400°C civarına kadar devam etmiş ve yaklaşık 129°C'lik bir geçiş aşaması oluşturmuştur.

$T_{\%10}$= 287,5°C değeri, uçucu piroliz ürünlerinin oluşumunun bu sıcaklık aralığında hız kazandığını göstermektedir. DTG eğrisinde T_2= 307,9°C civarında ana pikin sol tarafında gözlenen omuz yapısı; amorf yapısı ve dallanmış zincirleri nedeniyle termal kararlılığı selüloza kıyasla daha düşük olan hemiselüloz fraksiyonunun bozunmasına karşılık gelmektedir. Bu yapının konumu, hemiselüloz bozunması ile selüloz depolimerizasyonunun sıcaklık aralıklarının kısmen örtüştüğünü ortaya koymaktadır (McKendry, 2002; Yang ve ark., 2007; Collard ve Blin, 2014).

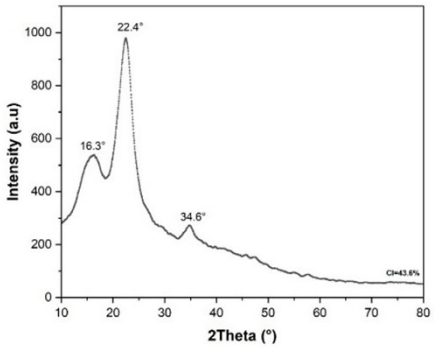
Bozunma hızının maksimuma ulaştığı nokta T_{max}=

380,8°C **ve** maksimum bozunma hızı yaklaşık -25 %/dk olarak belirlenmiştir. DTG eğrisindeki bu belirgin maksimum, selülozun termal ayrışmasıyla ilişkilendirilen karakteristik pik olup aktif piroliz evresinin ana kütle kaybı aşamasını temsil etmektedir (Yang ve ark., 2007). Numunemiz için $T_{\%50}$= 372,8°C değerinin T_{max} noktasına oldukça yakın olması, kütle kaybının aktif piroliz evresi içerisinde yüksek hızda ve yoğunlaşmış bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

Yaklaşık 400°C'nin üzerindeki pasif piroliz bölgesinde ise kütle kaybının hızı belirgin biçimde yavaşlamış ve TGA eğrisi yatay bir eğilime yönelmiştir. Bu davranış, ligninin aromatik ve çapraz bağlı yapısından kaynaklanan dirençli termal bozunma karakteri ile uyumludur (Brebu ve Vasile, 2010). Sürecin sonunda toplam kütle kaybı (WL) %83,8 ve artık kütle (Residue) ise %16,2 olmuştur. Bu bulgular, Rasool ve ark. (2018)'nın atık biyokütle olarak *S.alba* talaşları üzerindeki çalışmalarına ait termal bozunma davranışlarıyla paralellik göstermektedir.

3.3. X-ışını kırınımı analizi bulguları

Numunenin XRD difraktogramı, lignoselülozik biyokütleler için karakteristik olan ve doğal selüloz yapısını temsil eden Selüloz I polimorfuna özgü yansıma desenlerini oluşturmuştur (Şekil 4).



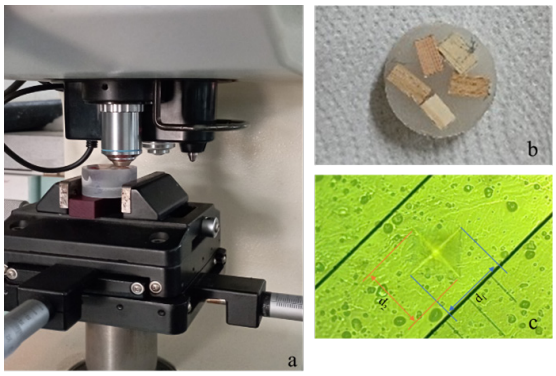
Şekil 4. Aksöğüt dal odununun XRD difraktogramı
Figure 4. XRD diffractogram of White willow branch wood

Difraktogram incelendiğinde, selülozun kristal örgüsünün (200) düzlemine karşılık gelen ve 2θ≈ 22,4° civarında konumlanan ana pik, yapıda kristalin selüloz fazının baskınlığını ortaya koymaktadır. Ana pikin yanı sıra, 2θ≈ 16,3° civarında, ($1\bar{1}0$) ve (110) düzlemlerinin örtüşen (*overlapped*) yansımalarını temsil eden geniş, düşük şiddetli bir saçılma bandı izlenmektedir (French, 2014). Bu pikin yapısı, amorf fazların katkısını da içeren daha düzensiz bir yapıya (*amorf halo*) işaret etmektedir (Boukir ve ark., 2019). Ayrıca 2θ≈ 34,6° civarında selüloz zincirlerinin boyuna periyodunu gösteren (004) düzlemine ait daha düşük yoğunluklu bir ikincil pik belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucu bu numunenin CrI değeri %43,6 bulunmuştur.

Lucaci ve ark. (2011), sağlıklı *S. alba* gövde odununda CrI değerini %49,22 raporlamışlar, Wang ve ark. (2024a) ise *S. psammophila* dal odununda 576 saatlik yapay yaşlandırma sonrası yaklaşık %48,50 CrI değerini bildirmişlerdir.

3.4. Vickers mikro sertlik bulguları

Deneysel çalışmada kullanılan Vickers mikro sertlik düzeneği Şekil 5'te gösterilmiş olup bu düzenek kullanılarak Aksöğüt dal odununun liflere paralel ve dik doğrultularında gerçekleştirilen ölçüm sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 5. a) Mikro sertlik test cihazı ve ölçüm düzeneği, b) Şeffaf reçineye gömülerek hazırlanmış numuneler, c) Vickers izinin optik mikroskop görüntüsü ve köşegen uzunluklarının ölçümü
Figure 5. a) Microhardness tester and measurement setup, b) Prepared samples embedded in transparent resin, c) Optical microscope image of the Vickers indentation and measurement of diagonal lengths

Tablo 1. Aksöğütün dal odununa ait Vickers mikro sertlik verileri
Table 1. Vickers microhardness data of White willow branch wood

Ölçüm yönü	$\bar{X}_{HV}$ (MPa)	Maks.	Min.
Lif ∥	100 (±6)*	110	72
Lif ⊥	67 (±3)*	93	63

*Parantez içi değerler standart sapmayı göstermektedir.
∥: Liflere parallel yön, ⊥: Liflere dik yön

Liflere paralel yönde ölçülen ortalama Vickers sertlik değeri 100 MPa, liflere dik yönde ise 67

MPa olarak belirlenmiştir. Bulgular, söğüt dalı odununda Vickers mikrosertliğin lif yönüne bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Buna göre, lif doğrultusundaki sertlik enine yöne kıyasla yaklaşık %49 daha yüksektir. Bu belirgin fark, odunun hücresel yapısındaki anizotropik organizasyonun doğrudan bir sonucudur (Wang ve ark., 2024b). Her iki yönde elde edilen standart sapma değerlerinin ortalama değerlere kıyasla sınırlı olduğu ve yön içi varyasyonun görece düşük düzeyde kaldığı tespit edilmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Doğal bir polimerik kompozit olan odun dış ortam koşullarına maruz kaldığında termal dalgalanmalar, fotokimyasal bozunma (UV ve IR radyasyonu), nem varyasyonları ve biyotik ajanların etkisiyle kompleks bir yapısal değişim sürecine girmektedir (Budakçı ve Karamanoğlu, 2014; Aşıkuzun ve İşleyen, 2019; Arpaci ve ark., 2021). Özellikle toprakla temas eden odunsu biyokütle, abiyotik aşınma ve mikrobiyolojik çürümenin birleşimi sonucu hızlandırılmış bir degradasyona uğrayabilmektedir (Wang ve ark., 2020; Zabel ve Morrell, 2020; Mattonai ve ark., 2021). Bu bozunma dinamiklerinin şiddeti, ağaç türünün anatomik karakteristiklerine, reaksiyon odunu gibi spesifik dokusal varyasyonlara ve maruziyet süresine doğrudan bağlıdır (Bucur, 2011).

Çalışmada incelenen aksöğütün dal odunu örneğinin SEM analizleri, 2 yıl boyunca toprakla temas halinde doğal dış ortam koşullarına maruz kalmasına rağmen, hücresel organizasyonun genel bütünlüğünü koruduğunu ve makroskobik düzeyde ileri derecede bir yapısal bozunmanın oluşmadığını göstermektedir. Mikrograflarda tespit edilen ve özellikle hücre köşelerinde yoğunlaşan düzensiz tabakalanmalar odunun maruz kaldığı çevresel stres geçmişiyle ilişkilendirilmektedir.

Çok sayıda çalışma, tekrarlı ıslanma-kuruma döngülerine maruz kalan odunsu materyallerde, hücre duvarı katmanlarının farklı büzülme katsayılarına sahip olması nedeniyle higroskopik yorgunluğun oluştuğunu ve bunun sonucu olarak, orta lamel ile ikincil çeper arasında mikro çatlakların geliştiğini rapor etmiştir (Pedreño-Rojas ve ark., 2019; Kropat ve ark., 2020; Zabel ve Morrell, 2020; Thybring ve Fredriksson, 2023). Dolayısıyla, gözlenen morfolojik heterojenliklerin, sadece mikrotom kesimine bağlı artefaktlar olmadığı, aynı zamanda uzun süreli sorpsiyon stresinin hücre duvarı adhezyonunu zayıflatmasının etkileri olduğu değerlendirilmektedir.

Bozunma belirtilerinin yanı sıra, fizyolojik adaptasyon nedeniyle dal odununun anatomisinde görülmesi muhtemel tiloz ve jelatinimsi tabakanın (reaksiyon odunu) oluşumuna işaret eden morfolojik yapılar saptanmıştır. Trahe lümenlerini kısmen veya tamamen tıkayan balon benzeri tiloz yapıları, parankima hücrelerinin trahe lümenine doğru genişlemesiyle oluşmaktadır ve ağacın yaralanma veya kesim sonrası öz suyu akışını keserek patojen ve nemin ilerlemesine karşı geliştirdiği doğal bir savunma mekanizmasıdır (De Micco ve ark., 2016). Nitekim SEM mikrograflarında bazı trahe lümenleri içerisinde belirgin mantar hifleri gözlenmiştir. Hiflerin hücre çeperini doğrudan delerek penetrasyon göstermediği, mevcut geçit açıklıkları üzerinden komşu hücre lümenlerine geçtiği anlaşılmaktadır. Hücre çeperlerinde yaygın ve ileri düzeyde yapısal çözülmenin gözlenmemesi, örnek materyalde ilerlemiş bir yapısal çürüklük gelişiminden ziyade yüzeysel veya erken evre biyolojik kolonizasyonun oluşumuna işaret etmektedir.

Dal odununda mekanik yüklenmelere bağlı olarak gelişen reaksiyon odununun varlığı da hücresel organizasyonu ve parankima aktivitesini etkileyerek tiloz oluşumunu dolaylı yolla destekleyebilmektedir. Tiloz oluşumu, odunun mekanik dayanımını doğrudan etkilememekle birlikte, geçirgenlik, kurutma ve kimyasal işlem davranışları üzerinde belirgin bir etkiye neden olmaktadır (Baraúna ve ark., 2014; Acosta ve ark., 2024; Koddenberg, 2025).

Lif hücrelerinin lümen çevresinde gözlenen jelatinimsi tabaka benzeri oluşumlar *Salix* türlerine ait SEM temelli çalışmalarda rapor edilmiştir (Gao ve ark., 2021) ve gözlemlerin tür-dal odunu anatomisiyle uyumlu olabileceğini düşündürmektedir. Reaksiyon odununda tanımlanan jelatinimsi tabaka, lif çeperinin iç kısmında yer alan, yüksek selüloz içeriğine sahip özel bir ikincil çeper tabakası olarak bilinmektedir (Gritsch ve ark., 2015). Ancak bu tabakanın kesin tanımlanması için TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu), histokimyasal boyamalar veya spektroskopik yöntemler gibi ileri teknikler gerekmektedir. Özellikle dallarda yaygın olarak gözlenen reaksiyon odununun oluşumu, hücresel morfolojiden kimyasal bileşime ve teknolojik performansa kadar geniş bir özellik yelpazesini etkilemektedir (Braz ve ark., 2014). Reaksiyon odunu oluşumunun, artan glikoz verimi nedeniyle biyoyakıt üretimi için istenen bir özellik olabileceği de öne sürülmüştür (Gritsch ve ark., 2015; Dadzie ve ark., 2018; Suansa ve Al-Mefarrej, 2020; Lima ve ark., 2020; Moreira ve ark., 2022).

Trahe, öz ışını ve lif morfolojisi, odunun fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli oranda etkilemektedir (Noshiro ve Suzuki, 2001; Keays ve ark., 2015).

Dolayısıyla elde edilen bulgular, dal odununun yapısal ve mekanik davranışlarını değerlendirmede hücresel düzeydeki heterojenliklerin dikkate alınarak standart gövde odunu varsayımlarının ötesine geçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Termal analiz sonuçları, söğüt dal odununun belirgin karakteristik bozunma evreleri ile biyokütle esaslı termokimyasal dönüşüm süreçleri açısından yüksek reaktivite potansiyeli sergilediğini göstermiştir. Biyokütlenin yapısal bütünlüğünü ve enerji potansiyelini yansıtan termal profil beklenen üç temel bozunma evresinde gerçekleşmiştir. Literatürde, doğal ortam koşullarında biyotik ajanların saldırısına uğrayan odunsu yapılarda mantarların öncelikli olarak holoselüloz fraksiyonunu metabolize ettiği bildirilmektedir. Bu selektif bozunma, bağıl lignin oranının artmasına ve buna bağlı olarak termal analizde kalan katı artık miktarının yükselmesine, yani uçucu madde oranının düşmesine neden olmaktadır (Goodell, 2003; Alfredsen ve ark., 2012; Qi ve ark., 2023; Amiandamhen ve ark., 2024; Rese ve ark., 2025). Bu çalışmada, hemiselüloz ve selüloz bozunma eğrilerinin birbirini takip eden ve kısmen örtüşen yapısı korunmuştur ve bunu izleyen hızlı kütle kaybı, numunenin pirolitik devolatilizasyon sürecinde yüksek uçucu ürün verimi ile karakterize edildiğini (Apaydın Varol ve Mutlu, 2023) göstermektedir.

Analiz sonunda elde edilen %16,2'lik kalıntı oranı, biyolojik bozunmaya uğramamış sağlıklı *S. alba* gövde ve dal odunları için bildirilen değerlerle (Serapiglia ve ark., 2009; Krzyzaniak ve ark., 2015; Stolarski ve ark., 2015; Rasool ve ark., 2018; Stolarski ve ark., 2020; Baker ve ark., 2022) uyumludur. Bu miktar, ağırlıklı olarak lignin kaynaklı sabit karbon yapıları ile inorganik mineral bileşenlerden oluşmaktadır (McKendry, 2002; Yang ve ark., 2007).

Bulgular, SEM analizi ile uyumlu olarak, incelenen saha koşullarında gerçekleşen kütle değişiminin, selüloz ve lignin gibi ana polimerlerin ileri düzey yıkımından ziyade, sınırlı bir degradasyon olarak değerlendirilmektedir. Mevcut bozunma, Keržič ve ark. (2024) tarafından belirtildiği üzere, suya duyarlı ekstraktif bileşenlerin sızması ve termal açıdan en hassas fraksiyon olan hemiselülozların çevresel etkilere bağlı kısmi zayıflaması ile açıklanabilir. DTG eğrisindeki hemiselülozun omuz yapısında gözlenen kararsızlıklar bu bölgesel zayıflamayı doğrulamaktadır. Bazı çalışmalarda, doğal ortam koşulları etkileriyle ekstraktiflerin ve hemiselülozun kısmi uzaklaşmasının, hücre duvarı matrisinde poroziteyi ve selüloz mikrofibrillerinin yüzey erişilebilirliğini artırarak, enzimatik/hidrolitik dönüşüm verimini iyileştiren bir faktör olduğu belirtilmektedir (Španić ve ark., 2018, Rönnberg-Wästljung ve ark., 2022).

Dar sıcaklık aralığında gerçekleşen örtüşmeli karbonhidrat bozunma profili ve yüksek uçucu madde içeriği piroliz ve gazlaştırma süreçlerinde reaksiyon kinetiğini destekleyen bir özellik olarak tanımlanmaktadır (McKendry, 2002; Slopiecka ve ark., 2012). Gövde odunları üzerine yapılan çalışmalar, benzer biçimde söğüt türlerinin düşük kül içeriği ve yüksek uçucu madde oranı sayesinde büyük ölçekli enerji üretiminde avantajlı olduğunu bildirmektedir (Rasool ve ark. 2018; Roman ve ark. 2021; Baker ve ark., 2022; Stolarski ve ark., 2024).

Aksöğütün dal odunu örneğine ait XRD difraktogramında gözlenen pikler, doğal odunun hücre duvarındaki selülozun tipik kristalin düzenlenmesini yansıtmaktadır. Hesaplanan %43,6'lık CrI, geniş yapraklı ağaç türleri için rapor edilen %40-%65 aralığı ile uyumludur (Park ve ark., 2010). Ancak, çalışmamızda elde edilen yapısal veriler termal analiz sonuçları ile değerlendirildiğinde, literatürdeki genel eğilimden farklılaşan önemli bir bulgu dikkati çekmektedir. Genellikle, daha yüksek kristallik derecesinin, selüloz zincirlerinin düzenli yapısı ve güçlü hidrojen bağları nedeniyle termal bozunmaya karşı direnci artırdığı ve T_{max} sıcaklığını yükselttiği bildirilmektedir (Poletto ve ark., 2012; Hideno ve ark., 2016). Tablo 2'de bazı sağlıklı ağaç türleri odunlarının Segal Yöntemi ile hesaplanmış CrI değeri ve T_{max} değerleri özetlenmiştir.

Tablo 2. Çeşitli lignoselüloz kaynaklarının termal ve yapısal özellikleri
Table 2**.** Thermal and structural properties of various lignocellulosic sources

Ağaç Türü	T_{max} (°C)	CrI (%)
Salix alba	381	43,6
Eucalyptus grandis	364	49,3
Mezilaurus itauba	350	52,7
Fagus crenata	367	68,0
Dipteryx odorata	368	55,7
Fagus sylvatica	368	43,0
Populus tremula	360	48,0

Poletto ve ark., 2012; Wang ve ark., 2021; Mattonai ve ark., 2021

Çalışmamızdaki *S. alba* örneğinin, *E. grandis* veya *D. odorata* gibi daha yüksek kristaliniteye sahip türlerden belirgin şekilde daha yüksek bir termal kararlılık sergilediği görülmektedir. Numunenin dış ortam koşullarında 2 yıl boyunca maruz kaldığı doğal yaşlanma sürecinde, termal kararlılığı düşük olan amorf bölgeler (hemiselüloz ve parakristalin

selüloz) hidroliz veya yıkanma yoluyla kısmen uzaklaşmış (Mi ve ark., 2023) ve bunun sonucu olarak yapıda termal olarak daha dirençli ve görece yoğunlaşmış bir lignoselülozik matris kalmış olabilir. Bu noktada, SEM analizlerinde gözlenen ve jelatinimsi tabaka ile morfolojik benzerlik gösteren oluşumların potansiyel etkisi de göz önüne alınmalıdır. Reaksiyon odununa özgü jelatinimsi tabakanın, yüksek moleküler düzenliliğe sahip görece saf selüloz mikrofibrilleri içerdiği (Gritsch ve ark., 2015) bilinmektedir. Bu tür düzenli selülozik organizasyon, termal bozunma sıcaklığının yükselmesine katkı sağlayabilecek bir mikroyapısal unsur olarak değerlendirilebilir. Segal yöntemi ile hesaplanan CrI, amorf bileşenlerin toplam hacimdeki oranına duyarlı olduğundan değeri nispeten düşük görülebilir. Ancak jelatinimsi tabaka benzeri yapılardaki yüksek yapısal mükemmellik, toplam kristalinite oranından bağımsız olarak termal bozunma kinetiğini yavaşlatma potansiyeline sahiptir (Hideno ve ark., 2016). Dolayısıyla, dal odununa özgü mikroyapısal heterojenliklerin, klasik gövde odunu için bildirilen kristalinite-termal kararlılık ilişkilerinden sapmalara yol açabileceği ve numunede gözlenen yüksek T_{max} değerine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Numunenin mikrosertlik analizleri, lif yönüne paralel ölçümlerin, liflere dik yöne kıyasla belirgin biçimde yüksek olduğunu ve yaklaşık %49 bir anizotropi sergilediğini ortaya koymuştur. Odun mekaniğinde sertlik ve elastikiyet özelliklerinin, yükün uygulanma yönü ve odun yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir (Ryniewicz ve ark., 2024). En yüksek rijitliğin liflerin eksen sürekliliği ve hücre çeperlerinin yük aktarımına etkin katılımı sayesinde paralel doğrultuda gerçekleştiği, buna karşılık liflere dik yönde, orta lamel bölgelerinin ve hücresel boşlukların indenter yüküne karşı daha sınırlı direnç göstermesi nedeniyle mekanik direncin azaldığı bildirilmektedir (Wagner ve ark., 2015; Xu ve ark., 2020). Dal odununda genç odun karakterinin baskın olabileceği dikkate alındığında, daha kısa lif uzunluğu, daha ince hücre çeperleri ve yüksek mikrofibril açısı gibi özellikler, mikrosertlik değerlerinde yönelime bağlı farklılıkların belirginleşmesine katkı sağlayabilmektedir (Donaldson, 2008; Lachenbruch ve ark., 2011; Zobel ve Sprague, 2012; Shmulsky ve Jones, 2011).

Doğal yaşlanma sürecinde lignin, oksidasyon ve fotodegradasyon süreçlerine daha duyarlıdır (Evans ve ark., 2008). Ligninin yapısı değiştiğinde, orta lamel ve hücre çeperi matrisi içindeki bağlayıcı rolü nedeniyle, hücreler arası yük aktarım mekanizması zayıflayarak liflere dik yöndeki sertlik daha fazla azalabilmektedir. Buna karşın, lif doğrultusundaki mekanik davranışın büyük ölçüde selüloz mikrofibrillerinin eksenel sürekliliği tarafından kontrol edilmesi, yaşlanmanın liflere paralel mikrosertlik üzerindeki etkisini daha sınırlı yapmaktadır (Feio ve Machado, 2015; Aşıkuzun ve İşleyen, 2019).

Benzer çalışmalarla kıyaslandığında, aksöğüt dal odununun kendine özgü bir mekanik özellik sergilediği görülmektedir. Van Casteren ve ark. (2012), yapraklı ağaç türlerinin dal odunları konulu çalışmalarında, aksöğüt odununun diğer türlere kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen daha yüksek boyuna rijitlik gösterdiğini bildirmiştir. Bu olgu, Desch ve Dinwoodie (1996) tarafından vurgulandığı üzere, dağınık gözenekli anatomik yapısı nedeniyle iletim elemanlarının odun dokusu boyunca homojen dağılması ve mekanik yükün matris içinde daha etkin aktarılması ile gerçekleşmektedir. Odun liflerinin kompozit uygulamalardaki davranışı hakkındaki çalışmalarda da (Oktaee ve ark., 2017; Barton-Pudlik ve Czaja, 2018) söğüt kaynaklı lignoselülozik materyalin polimer matris sistemlerinde alternatif takviye elemanı olabileceği gösterilmiştir.

Çalışmamızda kullanılan örnekte standart sapma değerlerinin ortalama verilere oranla sınırlı kalması, numunenin 2 yıllık çevresel maruziyetine rağmen mikromekanik düzeyde yapısal homojenliğini koruduğuna işaret etmektedir. Van Starrenburg ve ark. (2025), tepeden budama uygulamasına maruz kalan aksöğüt dallarının, doğal formda büyüyen örneklere kıyasla mekanik özellikler bakımından çok daha düşük bir varyasyon sergilediğini ve daha rijit bir yapı kazandığını bildirmişlerdir. Bu durum, budama sonrası ağaçta tetiklenen hızlı büyüme tepkisinin, biyolojik olarak daha kompakt ve standart bir doku formasyonuna yol açmasıyla açıklanmaktadır. Budama gibi antropojenik müdahalelerin veya kontrollü büyüme koşullarının, dal odununun mikromekanik düzeydeki heterojenliğini minimize ederek daha öngörülebilir bir malzeme karakterini oluşturduğu söylenebilir.

Çalışma, aksöğüt ağacının budanmış dal artıklarının yapısal, termal ve mekanik özelliklerini bütüncül bir yaklaşımla analiz ederek, ağırlıklı olarak gövde odununa odaklı çalışmalara tamamlayıcı ve alternatif bir bakış sunmuştur. Bulgular, dal odununun atık statüsünden çıkarılıp uygun depolama ve ön işlem stratejileri uygulandığında biyoyakıt, biyokömür, biyokompozit dolgu malzemesi ve lif bazlı ürünler için teknik açıdan yetkin bir hammaddeye dönüşebileceğini göstermektedir. Yerel ve küresel ölçekte yaygın olarak yetiştirilen aksöğüt dal artıklarının ekonomik değer kaybı ve enerji israfına neden olmak yerine alternatif hammadde

olarak değerlendirilmesi, sürdürülebilir malzeme döngüsü ve kaynak verimliliğini artırmanın yanı sıra kırsal ekonomiyi destekleyecek çok yönlü bir fırsat sağlamaktadır.

Dal biyokütlesi, günümüzde sürdürülebilir biyoekonomi yaklaşımları çerçevesinde, toprağı iyileştirici uygulamalardan endüstriyel yakıt üretimine ve biyotemelli kimyasal hammaddelere kadar geniş bir kullanım potansiyeli taşımaktadır. Buna rağmen, yüksek kabuk oranı, düzensiz geometrisi, gövde odununa kıyasla heterojen anatomik yapısı ve hasat sonrası işleme gereksinimleri (Nurmi, 1999; Shmulsky ve Jones, 2011), dal odununun büyük ölçekli endüstriyel sistemlere entegrasyonunu ve ticari valorizasyonunu sınırlandırmaktadır (Konatowska ve ark., 2021). Teorik çerçevede çoklu ürün çıktısına dayalı biyoarıtım kavramları önerilse de dal odunu biyokütlesini tam kapasiteyle işleyen ticari ölçekli entegre tesislerin yaygınlaşması, üretim, kurutma, lojistik ve ölçeklenebilir ön işlem teknolojilerindeki darboğazlar nedeniyle henüz istenen seviyeye ulaşmamıştır (Adams ve Lindegaard, 2016). Sonuç olarak, dal odununun endüstriyel kullanımını azami kılmak için gelecek çalışmalar, hammadde karakterizasyonuna dayalı sınıflandırma sistemlerini geliştirmeye, bozulmayı önleyici depolama protokollerini belirlemeye ve uygulamaya özgü ön işlem tekniklerinin optimizasyonuna odaklanmalıdır. Konu, Orman Genel Müdürlüğü'nün odun üretimi faaliyetleri için de oldukça önemlidir.

Teşekkür

Örnek hazırlama ve analiz süreçlerinde değerli katkı ve akademik desteklerini esirgemeyen hocalarıma içten teşekkürlerimi sunarım.

Örnek hazırlama ve analiz süreçlerinde değerli katkı ve akademik desteklerini esirgemeyen öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Barbaros YAMAN'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

Acosta, A.P., de Avila Delucis, R., Santos, O.L., Amico, S.C., 2024. A review on wood permeability: Influential factors and measurement technologies. *Journal of the Indian Academy of Wood Science* 21(1): 175-191. Doi: 10.1007/s13196-024-00335-4

Adams, P.W.R., Lindegaard, K.N., 2016. A critical appraisal of the effectiveness of UK perennial energy crops policy since 1990. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55: 188-202. Doi: 10.1016/j.rser.2015.10.126

Alfredsen, G., Bader, T.K., Dibdiakova, J., Filbakk, T., Bollmus, S., Hofstetter, K., 2012. Thermogravimetric analysis for wood decay characterisation. *European Journal of Wood and Wood Products* 70(4): 527-530. Doi: 10.1007/s00107-011-0566-7

Almuktar, S. A., Abed, S. N., Scholz, M., 2024. Biomass production and metal remediation by *Salix alba* L. and *Salix viminalis* L. irrigated with greywater treated by floating wetlands. *Environments* 11(3): 44. Doi: 10.3390/environments11030044

Amiandamhen, S.O., Nagy, N.E., Fongen, M., Alfredsen, G., 2024. Simultaneous thermal analysis for characterization of fungal depolymerisation of Norway spruce. *International Biodeterioration & Biodegradation* 186: 105687. Doi: 10.1016/j.ibiod.2023.105687

Amichev, B.Y., Hangs, R.D., Van Rees, K.C., 2011. A novel approach to simulate growth of multi-stem willow in bioenergy production systems with a simple process-based model (3PG). *Biomass and Bioenergy* 35: 473-488. Doi: 10.1016/j.biombioe.2010.09.007

Andleeb, L., Dar, A.R., Akhter, A., Qureshi, I.A., Shah, N.H., Wani, M.R., Roshan, M., 2018. Cultivation, diversity and bio-potential of *Salix* in the Kashmir Himalaya, India. *International Journal of Life Sciences* 6(1): 105-110

Andrei, M., Ene, N., Pintilie, L., Radu, N., Tomescu, A.J., Raiciu, A.D., 2024. Multiple natural approaches of *Salix alba*. *Archives of Microbiology & Immunology* 8(3): 410-427. Doi: 10.26502/ami.936500188

Apaydın Varol, E., Mutlu, Ü., 2023. TGA-FTIR analysis of biomass samples based on the thermal decomposition behavior of hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energies* 16(9): 3674. Doi: 10.3390/en16093674

Arıhan, O., Köroğlu, A., 2011. Studies on the anatomical structure of stems of willow (*Salix* L.) species (Salicaceae) growing in Ankara province, Turkey. *Turkish Journal of Botany* 35(5): 535-551. Doi: 10.3906/bot-1003-50

Argus, G., 2010. Salicaceae. Şu eserde: Magnoliophyta: Salicaceae to Brassicaceae, Vol. 7. Oxford University Press, p. 23-51

Arpaci, S.S., Tomak, E.D., Ermeydan, M.A., Yildirim, I., 2021. Natural weathering of sixteen wood species: Changes on surface properties. *Polymer Degradation and Stability* 183: 109415. Doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109415

Aşıkuzun, E., İşleyen, Ü.K., 2019. Determination of mechanical properties of aged wood material using Vickers microhardness test. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty* 19(1): 106-115. Doi: 10.17475/kastorman.543542

Auriga, R., Auriga, A., Borysiuk, P., Wilkowski, J., Fornalczyk, O., Ochmian, I., 2022. Lignocellulosic biomass from grapevines as raw material for particleboard production. *Polymers* 14(12): 2483. Doi: 10.3390/polym14122483

Aydemir, D., Aksu, O., Bardak, T., Yaman, B., Sözen, E., Yalçın, Ö.Ü., Gündüz, G., Koçan, N., 2024. Mecha-

nical characterization and strain analysis applied to the heat treatment of wood materials by means of digital image correlation. *BioResources* 19(2): 3010-3030. Doi: 10.15376/biores.19.2.3010-3030

Bajraktari, D., Bauer, B., Zeneli, L., 2022. Antioxidant capacity of *Salix alba* (Fam. Salicaceae) and influence of heavy metal accumulation. *Horticulturae* 8(7): 642. Doi: 10.3390/horticulturae8070642

Baker, P., Charlton, A., Johnston, C., Leahy, J.J., Lindegaard, K., Pisano, I., Prendergast, J., Preskett, D., Skinner, C., 2022. A review of willow (*Salix* spp.) as an integrated biorefinery feedstock. *Industrial Crops and Products* 189: 115823. Doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115823

Bakšienė, E., Titova, J., 2018. Effects of cultivation technologies on woody biomass yield of various willow (*Salix* spp.) cultivars. *Zemdirbyste* 105: 339-348. Doi: 10.13080/z-a.2018.105.043

Balzano, A., Merela, M., Čufar, K., 2022. Scanning electron microscopy protocol for studying anatomy of highly degraded waterlogged archaeological wood. *Forests* 13(2): 161. Doi: 10.3390/f13020161

Baraúna, E.E.P., Lima, J.T., Vieira, R.D.S., Silva, J.R.M.D., Monteiro, T.C., 2014. Effect of anatomical and chemical structure in the permeability of "Amapá" wood. *Cerne* 20(4): 529-534. Doi: 10.1590/01047760201420041501

Barton-Pudlik, J., Czaja, K., 2018. Fast-growing willow (*Salix viminalis*) as a filler in polyethylene composites. *Composites Part B: Engineering* 143: 68-74. Doi: 10.1016/j.compositesb.2018.01.031

Beims, R. F., Arredondo, R., Sosa Carrero, D. J., Yuan, Z., Li, H., Shui, H., Zhang, Y., Leitch, M., Xu, C. C., 2022. Functionalized wood as bio-based advanced materials: Properties, applications, and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157: 112074. Doi: 10.1016/j.rser.2022.112074

Berlyn, P.G., Miksche, J., 1976. Botanical microtechnique and cytochemistry. The Iowa State University Press, Ames, Iowa

Bhat, G.M., Islam, M.A., Malik, A.R., Rather, T.A., Khan, F.A., Mir, A.H., 2019. Productivity and economic evaluation of willow (*Salix alba* L.) based silvopastoral agroforestry system in Kashmir valley. *Journal of Applied and Natural Science* 11(3). 743-751. Doi: 10.31018/jans.v11i3.2104

Boukir, A., Fellak, S., Doumenq, P., 2019. Structural characterization of *Argania spinosa* Moroccan wooden artifacts during natural degradation progress using infrared spectroscopy (ATR-FTIR) and X-Ray diffraction (XRD). *Heliyon* 5(9): e02477. Doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02477

Braz, R.L., Nutto, L., Brunsmeier, M., Becker, G., Da Silva, D.A., 2014. Resíduos da colheita florestal e do processamento da madeira na Amazônia–Uma análise da cadeia produtiva. *Journal of Biotechnology and Biodiversity* 5: 168-181. Doi: 10.20873/jbb.uft.cemaf.v5n2.braz

Brebu, M., Vasile, C., 2010. Thermal degradation of lignin- A review. *Cellulose Chemistry & Technology* 44(9): 353

Bucur, V., 2011. Delamination in wood, wood products and wood-based composites. Springer, London, New York. Chapter 6-9

Budakçı, M., Karamanoğlu, M., 2014. Açık hava koşullarının odunun bazı fiziksel özelliklerine etkileri. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty* 14(1): 37-47

Chen, C., Kuang, Y., Zhu, S., Burgert, I., Keplinger, T., Gong, A., Li, T., Berglund, L., Eichhorn, S. J., Hu, L., 2020. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nature Reviews Materials* 5(9): 642-666. Doi: 10.1038/s41578-020-0195-z

Cobas, A.C., Tortoriello, M., 2024. Caracterización tecnológica: Edad de transición y análisis de la densidad y propiedades mecánicas en madera de *Salix* sp. *Revista FAVE Sección Ciencias Veterinarias* 23: 8-8. Doi: 10.14409/fa.2024.23.e0025

Collard, F.X., Blin, J., 2014. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38: 594-608. Doi: 10.1016/j.rser.2014.06.013

Dadzie, P.K., Amoah, M., Ebanyenle, E., Frimpong-Mensah, K., 2018. Characterization of density and selected anatomical features of stemwood and branchwood of *E. cylindricum*, *E. angolense* and *K. ivorensis* from natural forests in Ghana. *European Journal of Wood and Wood Products* 76: 655-667. Doi: 10.1007/s00107-017-1195-6

Değirmenci, F.Ö., 2017. Genetic Structures of *Salix alba* and *Salix excelsa* Populations From Two Major River Systems in Turkey. Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences. Doctoral dissertation, Ankara

De Micco, V., Balzano, A., Wheeler, E.A., Baas, P., 2016. Tyloses and gums: A review of structure, function and occurrence of vessel occlusions. *IAWA Journal* 37(2): 186-205. Doi: 10.1163/22941932-20160130

Desborough, M.J.R., Keeling, D.M., 2017. The aspirin story- From willow to wonder drug. *British Journal of Haematology* 177: 674-683. Doi: 10.1111/bjh.14520

Desch, H.E., Dinwoodie, J.M., 1996. Timber: Structure, properties, conversion and use, 7th ed. Red Globe Press / Macmillan Publishers, London, pp. 262-270

Donaldson, L., 2008. Microfibril angle: Measurement, variation and relationships- A review. *IAWA Journal* 29(4): 345-386. Doi: 10.1163/22941932-90000192

Dönmez, İ.E., Salman, H., 2021. Söğüt (*Salix alba* L.) odun ve kabuğunun kimyasal yapısı. *Turkish Journal of Forestry* 22(1): 38-42. Doi: 10.18182/tjf.854824

Evans, P.D., Urban, K., Chowdhury, M.J.A., 2008. Surface checking of wood is increased by photodegradation caused by ultraviolet and visible light. *Wood Science and Technology* 42(3): 251-265. Doi: 10.1007/s00226-007-0175-0

Feio, A., Machado, J.S., 2015. In-situ assessment of timber structural members: Combining information from visual strength grading and NDT/SDT methods- A review. *Construction and Building Materials* 101: 1157-1165. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.123

French, A.D., 2014. Idealized powder diffraction patterns for cellulose polymorphs. *Cellulose* 21(2): 885-896. Doi: 10.1007/s10570-013-0030-4

Gao, J., Jebrane, M., Terziev, N., Daniel, G., 2021. Enzymatic hydrolysis of the gelatinous layer in tension wood of *Salix* varieties as a measure of accessible cellulose for biofuels. *Biotechnology for Biofuels* 14(1): 141. Doi: 10.1186/s13068-021-01983-1

Gartner, B.L., 1995. Patterns of Xylem Variation Within a Tree and Their Hydraulic and Mechanical Consequences. Şu eserde: Gartner, B.L. (Ed.), Plant stems: Physiology and functional morphology, Academic Press, pp. 293-310

Goodell, B., 2003. Brown-rot Fungal Degradation of Wood: Our Evolving View. Şu eserde: ACS Symposium Series Vol. 845. American Chemical Society, Washington, DC, p. 97-118. Doi: 10.1021/bk-2003-0845.ch006

Gritsch, C., Wan, Y., Mitchell, R.A., Shewry, P.R., Hanley, S.J., Karp, A., 2015. G-fibre cell wall development in willow stems during tension wood induction. *Journal of Experimental Botany* 66(20): 6447-6459. Doi: 10.1093/jxb/erv358

Gupta, A., Singh, N.B., Choudhary, P., Sharma, J.P., Sankhayan, H.P., 2014. Estimation of genetic variability, heritability and genetic gain for wood density and fibre length in 36 clones of white willow (*Salix alba* L.). *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology* 7(2): 299-304. Doi: 10.5958/2230-732X.2014.00247.2

Hagel, S., Lüssenhop, P., Walk, S., Kirjoranta, S., Ritter, A., Bastidas Jurado, C. G., Mikkonen, K. S., Tenkanen, M., Körner, I., Saake, B., 2021. Valorization of urban street tree pruning residues in biorefineries by steam refining: conversion into fibers, emulsifiers, and biogas. *Frontiers in Chemistry* 9: 779609. Doi: 10.3389/fchem.2021.779609

Hideno, A., 2016. Comparison of the thermal degradation properties of crystalline and amorphous cellulose, as well as treated lignocellulosic biomass. *BioResources* 11(3): 6309-6319

Ihnát, V., Fišerová, M., Opálená, E., Russ, A., Boháček, Š., 2021. Chemical composition and fibre characteristics of branch wood of selected hardwood species. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen* 63(2): 17-30. Doi: 10.17423/afx.2021.63.2.02

Isebrands, J.G., Aronsson, P., Carlson, M., Ceulemans, R., Coleman, M., Dickinson, N., Dimitriou, J., Doty, S., Gardiner, E., Heinsoo, K., Johnson, J.D., Koo, Y.B., Kort, J., Kuzovkina, J., Licht, L., McCracken, A.R., McIvor, I., Mertens, P., Perttu, K., Riddell-Black, D., Robinson, B., Scarascia-Mugnozza, G., Schroeder, W.R., Stanturf, J., Volk, T.A., Weih, M., 2014. Environmental applications of Poplars and Willows. Şu eserde: Isebrands, J.G., Richardson, J. (Eds.), Poplars and Willows: Trees for Society and the Environment, CABI, Boston, p. 258-336

Karp, A., Shield, I., 2008. Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge. *New Phytologist* 179: 15-32. Doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02432.x

Kaya, M., Bülbül, R., Çavuş, V., 2024. Söğüt ağacının (*Salix alba* L.) öz ve diri odununun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi. *Turkish Journal of Forestry* 25(3): 302-312. Doi: 10.18182/tjf.1437947

Keays, J.L., Hatton, J.V., Bailey, G.R., Neilson, R.W., 2015. Present and future uses of Canadian poplars in fibre and wood products. Utah State University, digitalcommons.usu.edu/aspen_bib/5234 (Ziyaret tarihi: 12.01.2026)

Keržič, E., Vek, V., Oven, P., Humar, M., 2024. Changes in wood durability due to leaching of biologically active substances (extractives) resulting from weathering. *Case Studies in Construction Materials* 21: e03921. Doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03921

Koddenberg, T., 2025. A new dimension in wood anatomy education: Exploring softwood and hardwood structures in 3D. *European Journal of Wood and Wood Products* 83(6): 201. Doi: 10.1007/s00107-025-02329-6

Konatowska, M., Rutkowski, P., Budka, A., Goliński, P., Szentner, K., Mleczek, M., 2021. The interactions between habitat, sex, biomass and leaf traits of different willow (*Salix*) genotypes. *International Journal of Environmental Research* 15(2): 395-412. Doi: 10.1007/s41742-021-00323-3

Kropat, M., Hubbe, M.A., Laleicke, F., 2020. Natural, accelerated, and simulated weathering of wood: A review. *BioResources* 15(4): 9998-10035

Krzyzaniak, M., Stolarski, M.J., Szczukowski, S., Tworkowski, J., 2015. Thermophysical and chemical properties of biomass obtained from willow coppice cultivated in one- and three-year rotation cycles. *Journal of Elementology* 20(1): 191-202. Doi: 10.5601/jelem.2014.19.4.695

Kučerová, V., Výbohová, E., 2014. Zmeny celulózy pri vodnej hydrolýze dreva vŕby bielej (*Salix alba* L.). *Chemické Listy* 108(11): 1084-1089

Kuzovkina, Y.A., Weih, M., Romero, M.A., Charles, J., Hust, S., McIvor, I., Karp, A., Trybush, S., Labrecque,

M., Teodorescu, T.I., Singh, N.B., Smart, L.B., Volk, T.A., 2007. *Salix*: Botany and Global Horticulture. Şu eserde: Janick, J. (Ed.), Horticultural Reviews 34, Wiley, pp. 447-489. Doi: 10.1002/9780470380147.ch8

Lachenbruch, B., Moore, J.R., Evans, R., 2011. Radial Variation in Wood Structure and Function in Woody plants, and Hypotheses for Its Occurrence. Şu eserde: Meinzer, F., Lachenbruch, B., Dawson, T. (Eds.), Size- and Age-Related Changes in Tree Structure and Function, Tree Physiology Series, Vol. 4, Springer, Dordrecht, pp. 121-164. Doi: 10.1007/978-94-007-1242-3_5

Leitch, M., Miller, S., 2017. Optimizing Wood Utilization Based on Whole Tree Inherent Property Maps. Şu eserde: Kutnar, A., Muthu, S.S. (Eds.), Wood Is Good: Current Trends and Future Prospects in Wood Utilization, Springer, Singapore, pp. 3-17

Lima, M.D.R., Patrício, E.P.S., De Oliveira Barros Junior, U., De Assis, M.R., Xavier, C.N., Bufalino, L., Trugilho, P.F., Hein, P.R.G., De Paula Protásio, T., 2020. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. *Biomass and Bioenergy* 140: 105660. Doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105660

Lucaci, D., Visa, M., Duta, A., 2011. Copper removal on wood-fly ash substrates- Thermodynamic study. *Revue Roumaine de Chimie* 56(10-11): 1067-1074

Malik, A.H., Dar, G.H., Khuroo, A.A., Ganie, A.H., Munshi, M.H., Munshi, A.H., 2020. Worthful willows: Economic and ethnomedicinal uses of genus *Salix* L. in the Kashmir and Ladakh Himalayas. *Journal of Himalayan Ecology and Sustainable Development* 15: 1-17

Manzone, M., Gioelli, F., Balsari, P., 2019. Effects of different storage techniques on round-baled orchard-pruning residues. *Energies* 12(6): 1044. Doi: 10.3390/en12061044

Marková, I., Hroncova, E., Tomaskin, J., Turekova, I., 2018. Thermal analysis of granulometry selected wood dust particles. *BioResources* 13(4): 8041-8060. Doi: 10.15376/biores.13.4.8041-8060

Mattonai, M., Nardella, F., Zaccaroni, L., Ribechini, E., 2021. Effects of milling and UV pretreatment on the pyrolytic behavior and thermal stability of softwood and hardwood. *Energy and Fuels* 35(14): 11353-11365. Doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c01048

McKendry, P., 2002. Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology* 83(1): 37-46. Doi: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3

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. Doi: 10.1016/j.jaap.2006.12.007

MGM. 2025. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. İl ve ilçeler istatistikleri. mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx (Ziyaret tarihi: 10.01.2026)

Mi, X., Li, Y., Qin, X., Li, J., 2023. Effects of natural weathering on aged wood from historic wooden building: Diagnosis of the oxidative degradation. *Heritage Science* 11(1): 1-12. Doi: 10.1186/s40494-023-00956-x

Moreira, L.D.S., Andrade, F.W.C., Balboni, B.M., Moutinho, V.H.P., 2022. Wood from forest residues: Technological properties and potential uses of branches of three species from Brazilian Amazon. *Sustainability* 14(18): 11176. Doi: 10.3390/su141811176

Nenning, T., Tockner, A., Konnerth, J., Gindl-Altmutter, W., Grabner, M., Hansmann, C., Lux, S., Pramreiter, M., 2024. Variability of mechanical properties of hardwood branches according to their position and inclination in the tree. *Construction and Building Materials* 419: 135448. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135448

Noshiro, S., Suzuki, M., 2001. Ontogenetic wood anatomy of tree and subtree species of Nepalese *Rhododendron* (Ericaceae) and characterization of shrub species. *IAWA Journal* 22(1): 24-30.

Nurmi, J., 1999. The storage of logging residue for fuel. *Biomass and Bioenergy* 17(1): 41-47. Doi: 10.1016/S0961-9534(99)00023-9

Okai, R., Boateng, O., 2007. Analysis of sawn lumber production from logging residues of branchwood of *Aningeria robusta* and *Terminalia ivorensis*. *European Journal of Forest Research* 126(3): 385-390. Doi: 10.1007/s10342-006-0157-z

Oktaee, J., Lautenschläger, T., Günther, M., Neinhuis, C., Wagenführ, A., Lindner, M., Winkler, A., 2017. Characterization of willow bast fibers (*Salix* spp.) from short-rotation plantation as potential reinforcement for polymer composites. *BioResources* 12(2): 4270-4282

Paray, P.A., Gangoo, S.A., Masoodi, T.H., Qaiser, K.N., Islam, A.I., Maqbool, S., 2017. Selection, variation and heritability of candidate plus trees (CPTs) of *Salix alba*. *Electronic Journal of Plant Breeding* 8(3): 779-786. Doi: 10.5958/0975-928X.2017.00120.X

Park, S., Baker, J.O., Himmel, M.E., Parilla, P.A., Johnson, D.K., 2010. Cellulose crystallinity index: Measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance. *Biotechnology for Biofuels* 3(1): 10. Doi: 10.1186/1754-6834-3-10

Pedreño-Rojas, M.A., Morales-Conde, M.J., Rubio-de-Hita, P., Pérez-Gálvez, F., 2019. Impact of wetting-drying cycles on the mechanical properties and microstructure of wood waste-gypsum composites. *Materials* 12(11): 1829. Doi: 10.3390/ma12111829

Pędzik, M., Tomczak, K., Janiszewska-Latterini, D., Tomczak, A., Rogoziński, T., 2022. Management of forest residues as a raw material for the production of particleboards. *Forests* 13(11): 1933. Doi: 10.3390/f13111933

Picchi, G., Lombardini, C., Pari, L., Spinelli, R., 2018. Physical and chemical characteristics of renewable fuel

obtained from pruning residues. *Journal of Cleaner Production* 171: 457-463. Doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.025

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. Doi: 10.1016/j.biortech.2011.11.122

Praciak, A., Pasiecznik, N., Sheil, D., van Heist, M., Sassen, M., Correia, C.S., Dixon, C., Fyson, G., Rushforth, K., Teeling, C., 2013. The CABI Encyclopedia of Forest Trees. CABI, Oxfordshire, UK

Qi, J., Li, F., Jia, L., Zhang, X., Deng, S., Luo, B., Zhou, Y., Fan, M., Xia, Y., 2023. Fungal selectivity and biodegradation effects by white and brown rot fungi for wood biomass pretreatment. *Polymers* 15(8): 1957. Doi: 10.3390/polym15081957

Rasool, T., Srivastava, V.C., Khan, M.N.S., 2018. Bioenergy potential of *Salix alba* assessed through kinetics and thermodynamic analyses. *Process Integration and Optimization for Sustainability* 2: 259-268. Doi: 10.1007/s41660-018-0040-7

Rese, M., van Erven, G., Veersma, R.J., Alfredsen, G., Eijsink, V.G., Kabel, M.A., Tuveng, T.R., 2025. Detailed characterization of the conversion of hardwood and softwood lignin by a brown-rot basidiomycete. *Biomacromolecules* 26(2): 1063-1074. Doi: 10.1021/acs.biomac.4c01403

Roman, K., Roman, M., Szadkowska, D., Szadkowski, J., Grzegorzewska, E., 2021. Evaluation of physical and chemical parameters according to energetic willow (*Salix viminalis* L.) cultivation. *Energies* 14(10): 2968. Doi: 10.3390/en14102968

Rotherham, I.D., 2022. Willows in the farming landscape: A forgotten eco-cultural icon. *Biodiversity and Conservation* 31: 2495-2513. Doi: 10.1007/s10531-021-02324-2

Rönnberg-Wästljung, A. C., Dufour, L., Gao, J., Hansson, P.-A., Herrmann, A., Jebrane, M., Johansson, A.-C., Kalita, S., Molinder, R., Nordh, N.-E., Ohlsson, J. A., Passoth, V., Sandgren, M., Schnürer, A., Shi, A., Terziev, N., Daniel, G., Weih, M., 2022. Optimized utilization of *Salix*—Perspectives for the genetic improvement toward sustainable biofuel value chains. *GCB Bioenergy* 14: 1128–1144. Doi: 10.1111/gcbb.12991

Ryniewicz, A., Pietruch, M., Ryniewicz, A.M., Bojko, Ł., 2024. Tests of the mechanical and acoustic parameters of electric guitar bodies. *Drewno: Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty* 67(214). Doi: 10.53502/wood-194995

Schubert, M., Panzarasa, G., Burgert, I., 2022. Sustainability in wood products: a new perspective for handling natural diversity. *Chemical Reviews* 123(5): 1889-1924. Doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00360

Segal, L., Creely, J.J., Martin, A.E., Conrad, C.M., 1959. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. *Textile Research Journal* 29: 786-794. Doi: 10.1177/004051755902901003

Sharma, M., Altaner, C.M., 2014. Properties of young *Araucaria heterophylla* (Norfolk Island pine) reaction and normal wood. *Holzforschung* 68: 817-821. Doi: 10.1515/hf-2013-0219

Shmulsky, R., Jones, P.D., 2011. Forest Products and Wood Science: An Introduction, 6th ed., John Wiley and Sons Ltd., UK

Serapiglia, M.J., Cameron, K.D., Stipanovic, A.J., Smart, L.B., 2009. Analysis of biomass composition using high-resolution thermogravimetric analysis and percent bark content for the selection of shrub willow bioenergy crop varieties. *BioEnergy Research* 2(1): 1-9. Doi: 10.1007/s12155-008-9028-4

Sleight, N.J., Volk, T.A., Johnson, G.A., 2016. Change in yield between first and second rotations in willow (*Salix* spp.) biomass crops is strongly related to the level of first rotation yield. *BioEnergy Research* 9: 270-287. Doi: 10.1007/s12155-015-9684-0

Slopiecka, K., Bartocci, P., Fantozzi, F., 2012. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis. *Applied Energy* 97: 491-497. Doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.056

Španić, N., Jambreković, V., Klarić, M., 2018. Basic chemical composition of wood as a parameter in raw material selection for biocomposite production. *Cellulose Chemistry and Technology* 52(3-4): 163-169. Doi: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2018.52.18

Stolarski, M.J., Gil, Ł., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., Wu, A.M., 2024. Willow, poplar, and black locust debarked wood as feedstock for energy and other purposes. *Energies* 17(7): 1535. Doi: 10.3390/en17071535

Stolarski, M.J., Krzyżaniak, M., Warmiński, K., Załuski, D., Olba-Zięty, E., 2020. Willow biomass as energy feedstock: The effect of habitat, genotype and harvest rotation on thermophysical properties and elemental composition. *Energies* 13(16): 4130. Doi: 10.3390/en13164130

Stolarski, M., Mleczek, M., Szczukowski, S., Goliński, P., Waliszewska, B., Szentner, K., Rutkowski, P., Krzyżaniak, M., 2015. Characteristics of thermophysical parameters of selected *Salix* taxa with elemental analysis. *International Journal of Green Energy* 12(12): 1272-1279. Doi: 10.1080/15435075.2014.895734

Suansa, N.I., Al-Mefarrej, H.A., 2020. Branch wood properties and potential utilization of this variable resource. *BioResources* 15(1): 479-491. Doi: 10.15376/biores.15.1.479-491

Thurner, F., Mann, U., 1981. Kinetic investigation of wood pyrolysis. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development* 20(3): 482-488

Thybring, E.E., Fredriksson, M., 2023. Wood and mo-

isture. Şu eserde: Kutnar, A., Muthu, S.S. (Eds.), Springer Handbook of Wood Science and Technology, Springer International Publishing, Cham, pp. 355-397. Doi: 10.1007/978-3-030-81315-4_7

TS EN ISO 6507-1, 2023. Türk Standardları Enstitüsü. Metalik Malzemeler- Vickers Sertlik Deneyi- Bölüm 1: Deney Metodu. Ankara

Tyree, M.T., Zimmermann, M.H., 2002. Hydraulic architecture of whole plants. Şu eserde: Tyree, M.T., Zimmermann, M.H., Xylem Structure and the Ascent of Sap, 2nd ed., Springer-Verlag, pp. 212-216

Van Casteren, A., Sellers, W.I., Thorpe, S.K.S., Coward, S., Crompton, R.H., Ennos, A.R., 2012. Why don't branches snap? The mechanics of bending failure in three temperate angiosperm trees. *Trees* 26(3): 789-797. Doi: 10.1007/s00468-011-0650-y

Van Rooij, A., Badel, E., Barczi, J.F., Caraglio, Y., Alméras, T., Gril, J., 2023. Modelling the growth stress in tree branches: Eccentric growth vs. reaction wood. *Peer Community Journal* 3: e78. Doi: 10.24072/pcjournal.308

Van Starrenburg, C., Van Ijzerloo, L., Van de Koppel, J., Van der Wal, D., Bouma, T.J., 2025. Are willows suitable for flood defense? Quantifying mechanical properties of willow species. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 320: 109306. Doi: 10.1016/j.ecss.2025.109306

Volk, T.A., Verwijst, T., Tharakan, P.J., Abrahamson, L.P., White, E.H., 2004. Growing fuel: A sustainability assessment of willow biomass crops. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2(8): 411-418. Doi: 10.1890/1540-9295

Wagner, L., Bos, C., Bader, T.K., De Borst, K., 2015. Effect of water on the mechanical properties of wood cell walls: Results of a nanoindentation study. *BioResources* 10(3): 4011-4025

Wagner, N.D., He, L., Hörandl, E., 2021. The evolutionary history, diversity, and ecology of willows (*Salix* L.) in the European Alps. *Diversity* 13: 146. Doi: 10.3390/d13040146

Wang, J., Minami, E., Asmadi, M., Kawamoto, H., 2021. Thermal degradation of hemicellulose and cellulose in ball-milled cedar and beech wood. *Journal of Wood Science* 67(1): 32. Doi: 10.1186/s10086-021-01962-y

Wang, R., Dang, X., Gao, Y., Yang, X., Liang, Y., Zhao, C., 2020. Alternated desorption-absorption accelerated aging of Salix psammophila sand barrier. *BioResources* 15(3): 6696.

Wang, R., Meng, Z., Gao, Y., 2024a. Chemical characteristics of *Salix psammophila* sand barriers are accelerated degradation by ultraviolet irradiation and water. *Frontiers in Plant Science* 15: 1470347. Doi: 10.3389/fpls.2024.1470347

Wang, X., Zhao, W., Zhang, Y., Shi, J., Shan, S., Cai, L., 2024b. Exploring wood micromechanical structure: Impact of microfibril angle and crystallinity on cell wall strength. *Journal of Building Engineering* 90: 109452. Doi: 10.1016/j.jobe.2024.109452

Wilkinson, J.M., Evans, E.J., Bilsborrow, P.E., Wright, C., Hewison, W.O., Pilbeam, D.J., 2007. Yield of willow cultivars at different planting densities in a commercial short rotation coppice in the North of England. *Biomass and Bioenergy* 31: 469-474. Doi: 10.1016/j.biombioe.2007.01.020

Wronka, M., Wojnicz, D., Wronka, A., Kowaluk, G., 2025. Evaluation of Hazel-Derived Particleboard as a Substitute for Conventional Wood-Based Composites. *Materials* 18(16): 3773. Doi: 10.3390/ma18163773

Xu, E., Wang, D., Lin, L., 2020. Chemical structure and mechanical properties of wood cell walls treated with acid and alkali solution. *Forests* 11(1): 87. Doi: 10.3390/f11010087

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. Doi: 10.1016/j.fuel.2006.12.013

Zabel, R.A., Morrell, J.J., 2020. The Decay Setting: Some Structural, Chemical, and Moisture Features of Wood in Relation to Decay Development. Şu eserde: Wood Microbiology. Academic Press, Cambridge, MA, pp. 149-183

Zobel, B.J., Sprague, J.R., 2012. Juvenile wood in forest trees. Springer Science & Business Media, Berlin. Doi: 10.1007/978-3-642-72126-7