



X-ışını Kırınımı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Kullanılarak Kaynaklanan Gök nar, Meşe ve Kestane Odununun Yapısal Karakterizasyonu

Mustafa ZOR^{1,*}, Hızır Volkan GÖRGÜN², Mojgan VAZİRİ³

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Çaycuma MYO, Tasarım Bölümü, Zonguldak/TURKEY

²İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul/TURKEY

³Luleå University of Technology, Wood Science and Engineering, Skellefteå, Luleå/ SWEDEN

Öz

Bu çalışmada, kaynaklanmış gök nar, meşe ve kestane odunlarının morfolojik analizlerini tanımlamak için taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve selüloz kristanilitesini (CRI) tahmin etmek için X-ışını kırınım analizi (XRD) kullanılarak örnekler karakterize edilmiştir. Sonuçlar, XRD analizinde CRI değerlerinin gök nar, meşe ve kestane ağacı örneklerinde sırasıyla %57.55 ve %47.73 ve %56.66 olarak tespit edilmiştir. Diğer bir deyişle tüm ahşap örneklerin CRI değerinin, kaynağa tabi tutulduktan sonra arttığını göstermektedir. Bu artışın meşede, daha düşük çıkmasının nedeni olarak, polisakarit oranı farklılığından kaynaklandığı söylenebilir. SEM analizine göre ise ahşabın genel hücre yapısı kendini korurken, kaynaklı ara fazı oluşturmak için kullanılan yüksek sıcaklık ve basınçla kırılmalar meydana geldiği ve kaynaklama işlemi ile katılmış-erimiş hücreler arası malzemeden bir ara yüz tabakası oluşturduğu gözlemlenmiştir. Malzemede oluşan bu yeni hücresel yapı nedeniyle, numunelerin açık kaynaklı kısımlarında mikroskopik ve makroskopik ölçekte yüzey pürüzlülüğünü ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey karakterizasyonu, sürtünme ahşap kaynak, taramalı elektron mikroskop, X-ışını kırınımı

Structural Characterization of Welded Fir, Oak, and Chestnut using X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) Analysis

Abstract

This work characterizes welded wood specimens by estimating the crystallinity of cellulose by x-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) to identify the morphology of the welded fir, oak, and chestnut woods. The results showed that the cellulose crystallinity index (CRI) in the XRD analysis were identified to be 57.55% , 47.73%, and 56.66% for the fir, oak, and chestnut wood specimens, respectively. In other words, it shows that the CRI value of all wood samples increased after welding. It can be said that the reason lower increment in oak was due to the difference in polysaccharide ratio. According to the SEM analysis, it was observed that while the general cell structure of the wood was preserved, fractures occurred with the high temperature and pressure used to form the welded interphase. Additionally, an interface layer was formed from the solidified-molten intercellular material by the welding process. It has been observed that the open source parts of the samples reveal surface roughness at microscopic and macroscopic scales, due to this new cellular structure formed in the material.

Keywords: Surface characterization, friction wood welding, SEM, XRD

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author):

Mustafa ZOR, (Doç. Dr.); Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Çaycuma MYO, Tasarım Bölümü, 67900, Zonguldak/Türkiye. E-mail: mustafa.zor@beun.edu.tr
ORCID: 0000-0002-2115-8339

Geliş (Received) : 01.09.2021
Kabul (Accepted) : 10.11.2021
Basım (Published) : 15.12.2021

1. Giriş

Bu makalenin amacı, ahşap materyallerin morfolojik bağlanma özelliklerini gözlemlemek ve tutkalsız bağlama teknolojisi olarak bilinen ahşap kaynak metodu ile birleştirilen masif ahşap numunelerinin kristalinite derecesini ölçmektir. Kaynak teknolojisi, yapıştırıcı içermeyecek şekilde ahşapta bağlantılar oluşturma alanındaki en son araştırma teorisi olarak bilinmektedir. Son yıllarda ahşap kaynağı, ahşap yapıştırmaya hızlı ve uygun maliyetli bir alternatif olduğu için metal, otomasyon ve diğer endüstrilerde tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir (Martins vd., 2013; Zhang vd., 2014). Kaynak teknolojisi, mühendislik uygulamalarının pek çok alanında (metal ve plastik bağlantı endüstrisi vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ahşap kaynaklama işlemi ve bu işlem sonrası malzeme bağlantılarının mekanik özellikleri son on yılda Avrupa'da incelenmiş ve bu kaynaklama yöntemi mobilya endüstrisinde (Stamm 2005; Navi ve Sandberg, 2012) ve yapı kerestelerinin birleştirilmesinde (inşaat sektörü için) başarıyla uygulandığı söylenebilir (Pizzi vd., 2004).

Kaynaklama işleminde, ahşap malzemelerin birbirleriyle sürtünmesi nedeniyle karşılıklı bir ara yüz tabakası oluşarak arasında bağlanma meydana getirmekte ve ahşaptaki üç ana polimer olan selüloz, hemiselüloz ve ligninde bazı değişiklikler meydana getirmektedir. Bu işlem sırasında, bazı ahşap bileşenler sonunda katılaşma sertleşmeden önce yumuşamaktadır. Ahşap ısıtıldığında, selüloz nispeten sabit olup, hemiselüloz üretimi termal pirolize uğramakta ve odun kaynağı işlemi sırasında depolimerize olan lignin yumuşayarak polimerleşmektedir (Vaziri 2011; Sandberg vd., 2013; Zhou vd., 2014). Ahşabı birbirine bağlamak için sürtünme kuvvetindeki meydana gelen ısı, hücrel bozulma tarafından üretilen ısı olarak görülmektedir (Gfeller ve diğerleri, 2003). Yapılan bir çalışmada, ahşap yüzeylerin titreşim kaynağı ile yapışmasına, bağlanan ara yüzdeki ahşap yoğunluğunda önemli bir artış olduğu görülmektedir (Gfeller vd., 2003; Leban vd., 2004). Kristalinite derecesi, düzenli (kristal) ve düzensiz (amorf) selülözün oranı ve konfigürasyonu olması nedeniyle ahşap özelliklerini değerlendirmek için çok kullanışlıdır. Selüloz kristalinitesinin belirlenmesi, ağaç işleme alanlarında ahşap bileşenlerin doğru kullanımı için oldukça önemli olduğu bilinmektedir. Bu kapsamda, X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskopik (SEM) analizi, bazı araştırmacılar tarafından, kaynak sonrası ahşap yüzeylerin iç yapışma mukavemetini incelemek ve bağlantıların selüloz kristalinite değerlerini ortaya çıkarmak için kullanılmıştır (Pizzi vd., 2004; Properzi vd., 2005). Ahşap bileşenler değiştikçe, serbest fenolik hidroksil gruplarının sayısı artmakta ve ara yüzeyin stabilitesini güçlendirmek için selüloz ile hidrojen bağları oluşmaktadır (Delmotte vd. 2009). Zhu vd. (2017) yaptığı bir çalışmada, ahşap dübeller ile ahşap malzeme arasındaki etkileşimi incelemiş ve ahşap dübel kaynak işleminden sonra XRD kullanılarak selülözün kristalinite derecesinin arttığını ifade etmişlerdir.

Literatürde kaynak teknolojisinde kullanılan bazı ağaç türleri mekanik testlere (makaslama/kesme dayanımı) ve fiziksel testlere (su absorpsiyonu, çatlak analizleri ve X-ışını mikro densitometresi) tabi tutulmuştur. Çam odunu (Vaziri vd. 2009; Vaziri vd., 2010), kayın odunu (Stamm vd., 2005), ladin odunu (Gfeller vd., 2003; Jones ve Pizzi 2009), kavak odunu (Ganne-Chedeville vd., 2006), iroko, dişbudak, lale ve ayous odunları (Zor, 2020) gibi kaynak teknolojilerinde kullanılmak üzere farklı ağaç türlerinin karakterizasyon analizlerine rastlanmaktadır. Mobilya endüstrisinde özellikle dış mekânlarda yaygın olarak kullanılan göknar, meşe ve kestane türlerinin, kaynaklanma işlemi sonucu oluşan değişimler ile ilgili XRD ve SEM analizleri incelemelerin literatürde henüz yer almadığı söylenebilir. Bu çalışmada, Delmotte vd. (2008) ile Segovia ve Pizzi'nin (2009) yaptığı çalışmalarda kullanılan yöntem kullanılarak, bahsi geçen ağaç türlerinin kaynaklanma işlemi sonucu XRD metodu ile selüloz kristalinite derecesini belirlenmesi ve SEM metodu kullanılarak morfolojik değişiklikleri gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Göknar (*Abies bornmulleriana* Mattf.), meşe (*Quercus robur* L.) ve kestane (*Castanea sativa* Mill.) odunları, Türkiye'de faaliyet gösteren bir fabrikadan temin edilmiş ve 200 mm × 20 mm × 20 mm boyutlarındaki numunelere ebatlanmıştır. Test edilmeden önce numuneler % 12 rutubet içeriğine ulaşana kadar (%65 bağıl nem ve 20°C sıcaklık) iklimlendirme odasında bekletilmiştir. Numuneler, Luleâ Teknoloji Üniversitesi, İsviçre'de doğrusal bir titreşimli kaynak makinesi ile (LVW 2061; Mecasonic, Annemasse, Fransa), nihai boyutları 200 mm × 20 mm × 40 mm (Boy x Radyal x Teğet) olacak şekilde birbirlerine bağlantı oluşturmak için her seferinde iki parça birbirine kaynaklanma işlemine tabi tutulmuştur. İşlem Tablo 1'deki kaynak makinesi parametrelerine göre gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında malzemeler üzerinde daha detaylı araştırmalar elde etmek için Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nde XRD ve SEM analizlerine dayalı karakterizasyonu belirlemek için ilgili ölçümlere uygun olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır.

Tablo 1. Örneklerin hazırlanmasında kullanılan makine parametreleri.

Parametre	Birim	Değer
Kaynaklama Basıncı (WP1 and WP2)	MPa	1.3 - 1.8
Kaynaklama Süresi (WT1 and WT2)	s	2.5 - 3.0
Kaynak Hareketi (WD)	mm	2.0
Sıklık	Hz	150.0
Tutma-Kaldırma Basıncı (HP)	MPa	2.0
Kaldırma Süresi (HT)	s	10.0

2.2. Metod

2.2.1. X-ışını kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD) ölçümleri, bir PANalytical XRD difraktometresi (Hollanda) üzerinde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tüm örneklerin kristalin yapısal analizi, CuK α radyasyonlu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) bir difraktometre üzerinde kaydedilmiştir. X-ışını difraktometresi, 40 mA akım yoğunluğu ile 40 kV voltajda çalıştırılmıştır. Tarama aralığı 0,071°/s tarama hızında $2\theta = 10^\circ$ ila 90° arasındadır. Kristallik indeksi (CrI), kristalinite değerinin belirlenmesi için Segal vd., (1959) tarafından kullanılan pik yüksekliği (Peak height) ve Curve Fitting metodundan yararlanılmıştır.

2.2.2. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

Numunelerin morfolojik özellikleri, 15 kV hızlanma voltajında bir Quanta 450 FEG masa üstü mikroskopu (FEI Company, Hillsboro, OR) kullanılarak karakterize edilmiştir. Test numuneleri sıvı nitrojene daldırılmış ve malzemeler uygun bir kesici yardımı ile pürüzsüz olacak şekilde ikiye bölünerek, test numuneleri kaynak bölgesinden alınmıştır.

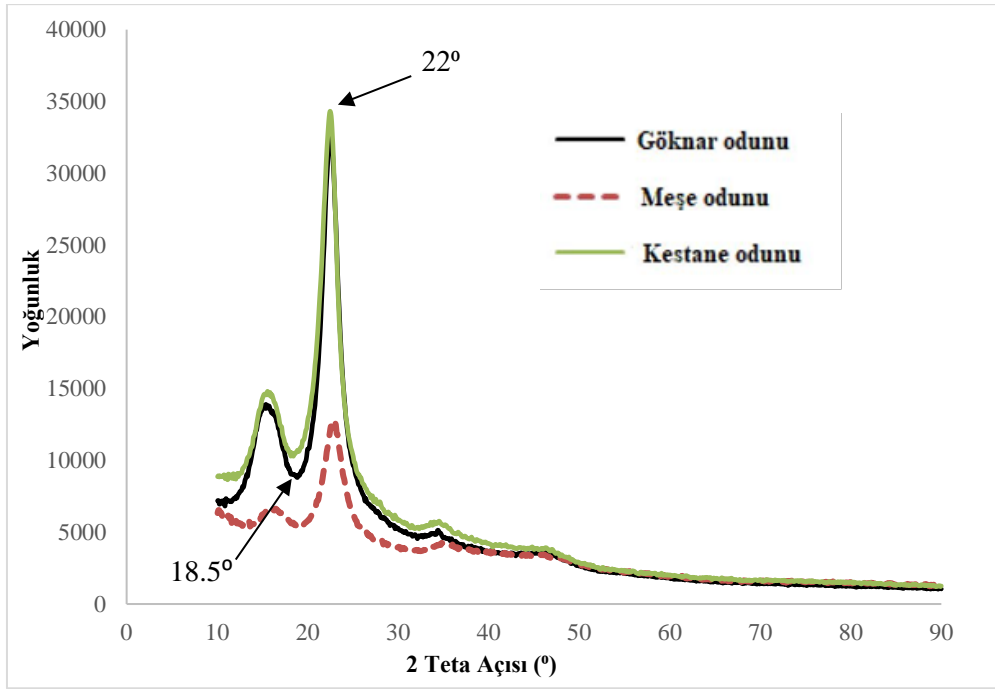
3. Bulgular ve Tartışma

X-ışını kırınımı (XRD)

X ışını kırınımı, özellikle lignoselülozik malzemeler arasında yer alan ahşap, farklı molekül içi ve moleküller arası hidrojen bağlarında yer alan ve kristal düzenlemelere sahip olan selüloz makro moleküllerinde serbest hidroksil gruplarının varlığından dolayı belirli bir derecede selüloz kristalinitesi sergilemektedir (Broda ve Carmen-Mihaela, 2019). Tablo 1’de, bu çalışma kapsamında elde edilen X-ışını kırınım sonuçları ile selüloz kristalinite değerleri verilmiştir. X-ışını kırınımı, kaynaklanan odun tiplerine göre göknar ve kestanede birbirine yakın olduğu görülmektedir. Kaynaklanmamış kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, kaynak işlemi ağaç türlerinin selüloz kristalinite değerinde artışlar meydana getirdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçların farklı orandaki lignin ve polisakkarit içeriği ile ilişkili olduğunu gösteren literatür ile uyumlu olduğu söylenebilir (Betts vd., 1997; Malherbe ve Cloete, 2002; Mathews vd., 2015).

Tablo 1. Kaynaklanmış ve kaynaklanmamış odun örneklerinin ortalama selüloz kristalinite indeksleri

Örnek	2 θ	Cr.I (%)
Kaynaklanmış Göknar	22,54	57,55
Kaynaklanmamış Göknar	22,3	32
Kaynaklanmış Meşe	22,57	47,73
Kaynaklanmamış Meşe	22,3	46,2
Kaynaklanmış Kestane	22,51	56,68
Kaynaklanmamış Kestane	22,3	36

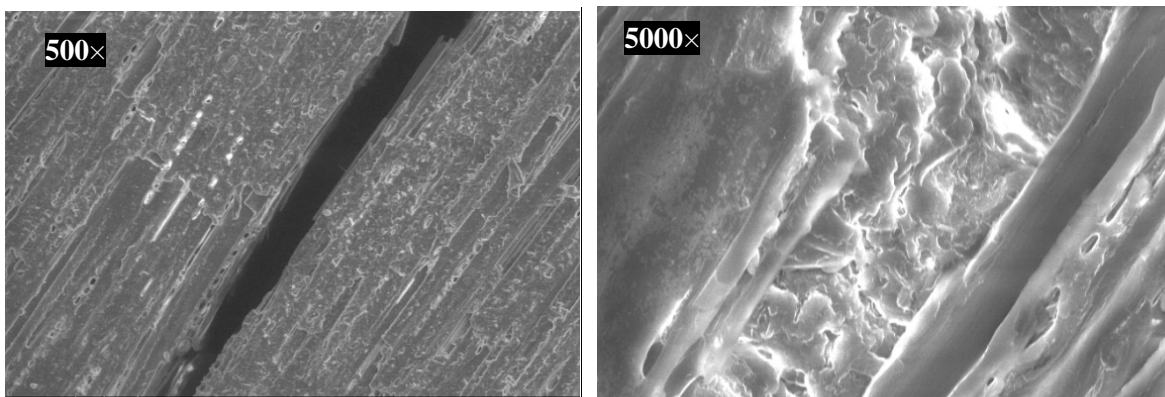


Şekil 1. Kaynaştırılmış ve kaynaştırılmamış odun örneklerinin XRD sonucunu

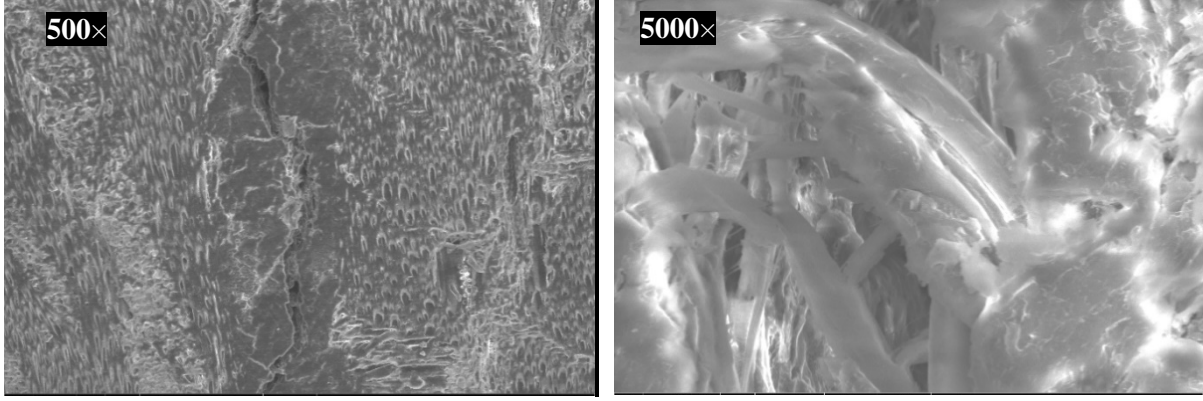
Ahşap, yüksek ısıdan dolayı hidrolize uğramakta ve yapısal olarak değişen bu malzemenin selüloz kristanilite derecesinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Kaynak işlemi sırasında, odun bileşenlerinde selüloz, hemiselüloz ve ligninin depolimerizasyonu ve pirolizi dâhil kimyasal değişiklikler meydana gelmektedir (Sun ve diğerleri 2010; Manhert ve diğerleri 2013). Zhu vd. (2017), hemiselüloz ve ligninin bazı kısımlarının hidrolizinden kaynaştırılan selüloz kristallik derecesini arttıran mono kristaller oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

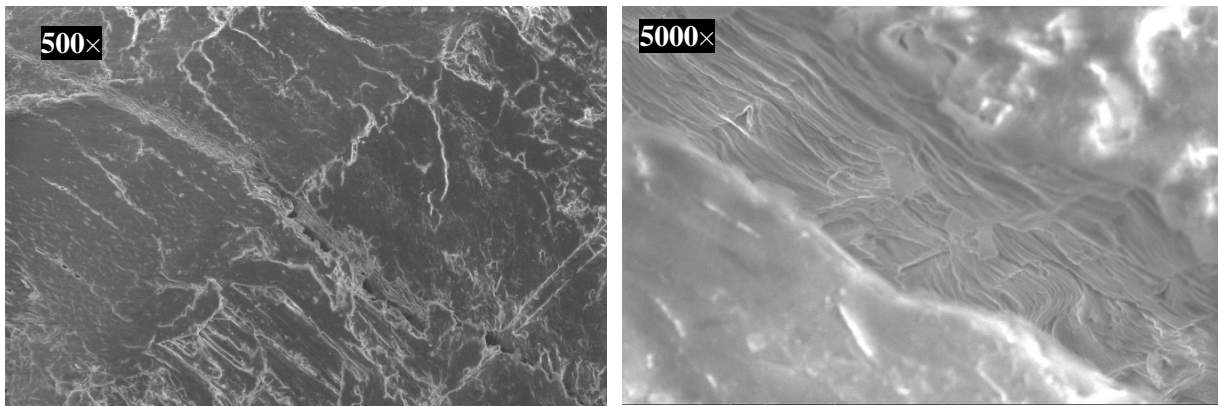
Şekil 2, 3 ve 4, kaynaştırılmış ahşap örneklerinin yüzey morfolojilerini göstermektedir. 500× ve 5000× büyütmede kaynak sırasında elde edilen selüloz lifleri ve ağaç hücreleri (traheid) ile lignin füzyonunun SEM görüntüleri, karışık ve ayrılmış traheidleri, kaynaştırılmış bir hücreler arası lignin kütlelerini ve erimiş bir lignine daldırılmış traheidleri ve lifleri göstermektedir. Kaynak işlemi sırasında ağaç lifleri yırtılarak tahrip edilmektedir. Bu nedenle ahşap, orijinal hücreli yapısını kaybetmektedir. Kaynaştırılmış ahşap, ısının etkisiyle daha düşük geçirgenliğe neden olarak kristanilite yoğunluğunu arttırmıştır.



Şekil 2. Kaynaştırılmış gök nar odunu ve açık kaynak bölgesinin SEM görüntüsü



Şekil 3. Kaynaklanmış meşe odunu ve erimiş ligninin SEM görüntüsü



Şekil 4. Kaynaklanmış kestane odunu ve ara yüzey tabakasının SEM görüntüsü

Kaynaklama işlemi ile katılmış-erimiş hücreler arası malzemeden bir ara yüz tabakası oluşturduğu tespit edilmiştir. Bunun malzemede hücrel bir yapı oluşturduğu ve numunelerin açık kaynaklı kısımlarında mikroskobik ve makroskopik ölçekte yüzey pürüzlülüğünü ortaya çıkardığı görüldüğü söylenebilir. Benzer sonuçlar, Vaziri vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada da görülmektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

1. Kaynaklanmış ağaç örnekleri için kristalinite derecesi sırasıyla göknar, meşe ve kestane ağaç türleri için % 57.55, % 47.73 ve % 56.66 olarak bulunmuştur. Kaynaklama işleminden sonra kısmen parçalanmış yüzeylerin yeniden kristalleşmesi ve düzenlenmesi nedeniyle selüloz kristalinite derecesini arttırmıştır. XRD analizi, selüloz ve hemiselüloz pirolizinin kaynak işlemi sırasında gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.
2. SEM analizi ile kaynaklı malzemelerin ara yüzeyleri hidrofobik kimyasal yapıya sahip daha yoğun yapı oluştuğunu göstermiş ve kırılmaların yüzeylerde yüksek ısı ile meydana geldiği gözlemlenmiştir.
3. Kaynak birleştirme teknolojisi orman ürünleri endüstrisinde oldukça yeni bir alandır. Kaynak süresi, rutubet ve suya daldırma gibi birçok ahşap kaynağı parametresi daha önce çalışılmıştır. Farklı ağaç türleri üzerinde, bu parametreler daha fazla değerlendirilmeli ve kullanım alanlarına göre yapısal ileri analiz metodları ile desteklenmelidir. Malzemelerin mekanik özellikleriyle birlikte, selüloz kristalinite değerlerinin belirlenmesi ve morfolojik testlerle gözlemlenmesi de orman ürünleri sektöründe, ahşap malzemenin kullanım ömrü açısından bilgi edinmede destekleyici uygulamalardan olduğu söylenebilir.

Teşekkür

Yazarlar, ahşap malzemelerin temininde destek sağladığı için Nova Orman Ürünlerine teşekkür etmektedir. Ayrıca yazarlar, konuk araştırmacı Dr. Mustafa ZOR'a, İsveç, Skellefteå'daki Luleå Teknoloji Üniversitesi'nde yapması için burs desteği aldığı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK- 2219/BİDEB, 2019) teşekkür eder.

Kaynaklar

1. **Betts R.A., Cox, P.M., Lee, S.E., Woodward, F.L. (1997).** Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations. *Nature* 387: 796-799.
2. **Broda M., Carmen-Mihaela P., (2019).** Natural decay of archaeological oak wood versus artificial degradation processes—An FT-IR spectroscopy and X-ray diffraction study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 209:280-287.
3. **Ganne-Chedeville, C., Properzi, M., Pizzi, A., Leban, J-M. and Pichelin, F. (2006).** Parameters of wood welding: a study with infrared thermography, Vol. 60, 2006, pp. 434-438.
4. **Jones, D. and Pizzi, A. (2009).** Frictional Welding of Dowels into Modified Wood. Cost Action E34 Workshop in Slovenia on Bonding of Modified Wood.
5. **Delmotte, L., Mansouri, H.R., Omeani, P., Pizzi, A. (2009).** "Influence of wood welding frequency on wood constituents chemical modifications. *J Adhes Sci Technol* 23:1271–1279.
6. **Ganne-Chedeville, C., Pizzi, A., Thomas, A., Leban, J.M., Bocquet, J.F., Despres, A., Mansouri, H. (2005).** Parameter interactions in twoblock welding and the wood nail concept in wood dowel welding. *J Adhes Sci Technol* 19:1157–1174.
7. **Gfeller, B., Zanetti, M., Properzi, M., Pizzi, A., Pichelin F., Lehmann, M., and Delmotte L. (2003).** Wood bonding by vibration welding. *J. Adhes. Sci. Technol.* 17, 1425–1590. DOI: 10.1163/156856103769207419.
8. **Karl-Christian, M., Stergios, A., Gerald, K., Holger, M. (2013).** Topochemistry of heat-treated and N-methylol melamine-modified wood of koto (*Pterygota macrocarpa* K. Schum.) and limba (*Terminalia superba* Engl. et Diels). *Holzforschung* 67:137–146.
9. **Delmotte, L., Ganne-Chedeville, C., Leban, J-M., Pizzi, A. and Pichelin, F. (2008).** CPMAS ¹³C NMR and FT-IR investigation of the degradation reactions of polymer constituents in wood welding, *Polymer Degrad. & Stabil.* 93, 406-412
10. **Leban, J.-M., Pizzi, A., Wieland, S., Zanetti, M., Properzi, M. and Pichelin, F. (2004).** X-ray microdensitometry analysis of vibration-welded wood. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18, 673685.
11. **Properzi, M., Leban, J-M., Pizzi, A., Wieland, S., Pichelin, F. and Lehmann, M. (2005).** Influence of grain direction in vibrational wood welding, *Holzforschung*. 59, 23–27
12. **Malherbe, S., Cloete, T.E. (2002).** Lignocellulose biodegradation: fundamentals and applications. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 1: 105-114.
13. **Martins, S.A., Ganier, T., Pizzi, A., and Del Menezzi, C. H. S. (2013).** Parameter scanning for linear welding of Brezilian Eucalyptus benthamii wood. *Eur. J. Wood. Prod.*, 71, 525-527. DOI:10.1007/s00107-013-0696-1.
14. **Mathews, S.L., Pawlak, J., Grunden, A.M. (2015).** Bacterial biodegradation and bioconversion of industrial lignocellulosic streams. *Applied Microbiology and Biotechnology* 99: 2939-2954.
15. **Navi, P., and Sandberg, D. (2012).** Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood. EPFL Press, Lausanne, Switzerland, pp. 47-50.
16. **Pizzi, A., Leban, J.-M., Kanazawa, F., Properzi, M. and Pichelin, F. (2004).** Wood dowel bonding by high-speed rotation welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18, 1263-1278.
17. **Sandberg, D., Haller, P., Navi, P. (2013).** Thermo-hydro and thermos-hydro-mechanical wood processing: an opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Mater Sci Eng* 8 (1):64–88.
18. **Segal, L., Creely, J.J, Martin, Jr, 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.
19. **Segovia, C., Pizzi, A. (2009).** Performance of dowel-welded wood furniture linear joints. *J Adhes Sci Technol* 23:1293–1301
20. **Stamm, B. (2005).** Development of friction welding of wood physical, mechanical and chemical studies. PhD thesis No. 3396, Ecole Fe'de rale de Lausanne, Switzerland.
21. **Sun, Y., Royer, M., Diouf, P.N., Stevanovic, T. (2010).** Chemical changes induced by high-speed rotation welding of wood-application to two Canadian hardwood species. *J Adhes Sci Technol* 24:1383–1400.
22. **Vaziri, M., Lindgren O., and Pizzi, A. (2009).** Influence of welding parameters and wood properties on water absorption in Scots pine joints induced by linear friction welding. *J. Adhes. Sci. Technol.* 25(15), 1819-1828. DOI: 10.1163/016942410X525731
23. **Vaziri, M., Lindgren, O., Pizzi, A., and Mansouri, H. R. (2010).** Moisture sensitivity of Scots pine joints produced by linear frictional welding. *J. Adhes. Sci. Technol.* 24(8), 1515-1527. DOI: 10.1163/016942410X501098.
24. **Vaziri, M., Karlsson, O., Abrahamsson L., Lin C-F, and Sandberg, D. (2020).** Wettability of welded wood-joints investigated by the Wilhelmy method. Part 1: Determination of Apparent Contact Angles, Swelling and Water Sorption. *Holzforschung*. Doi.org/10.1515/hf-2019-0308.
25. **Zhang, H., Pizzi, A. and Xiaoning, L. (2014).** Palmyra palm bonding by vibrational welding. *Eur. J. Wood Prod.*, 72, 693-695. DOI: 10.1007/s00107-014-0825-5.

26. **Zhang, H., Pizzi, An., Lu, X. And Zhou, X., (2014).** Optimization of Tensile Shear Strength of Linear Mechanically Welded Outer-to-Inner Flattened Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*). BioResources,9(2):2500-2508.
27. **Zhou, X.J, Pizzi, A., Du, G.B. (2014).** Research progress of wood welding technology (bonding without adhesive). China Adhesives 23: 47–53.
28. **Zhu, X., Y., S., Gao, Y., Zhao, Y., Qiu, Y. (2017).** Mechanical evaluation and XRD/TG investigation on the properties of wooden dowel welding. BioRes, 12(2):3396-3412.
29. **Zor, M., Görgün, V. H., Mojgan V. (2019).** Water Resistance of Welded Oak, Fir and Chestnut. III. International Mediterranean Forest and Environment Symposium, Kahramanmaraş, TURKEY.
30. **Zor, M. (2020).** Water resistance of heat-treated welded Iroko, Ash, Tulip and Ayous wood. BioRes, 15(4):9584-9595.