



Ağaç malzemenin sıkıştırılarak yoğunlaştırılması konusunda yapılan çalışmalar

Mustafa Tosun¹, Sait Dünder Sofuoğlu^{2*}

Öz

Ağaç malzeme endüstrisi dünya ekonomisinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Ağaç ve ağaç kökenli malzemeler birçok olumlu özelliği nedeniyle uzun süredir birçok uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal görüntüsü sebebiyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte ağaç malzemenin bazı olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. Ağaç malzeme genellikle yüksek fiziksel ve mekanik özellikler gerektiren kullanım alanlarında çok yumuşak ve zayıf olabilmektedir. Yoğunluğu artırılmış ağaç malzeme diğer yapısal malzemelere alternatif olarak kullanılabilir. Son yıllarda çevresel duyarlılığın artması sonucu ağaç malzemeyi biyolojik bozunmaya karşı koruyan ve boyutsal stabilitesini arttıran çevreye zararsız yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar; Termo-Mekanik (TM), Termo-Hidro-Mekanik (THM), Termo-Vibro-Mekanik (TVM) yoğunlaştırma ve Viskoelastik-Termal-Sıkıştırma (VTC) şeklinde sıralanabilmektedir. Bu çalışmada 2004-2021 yılları arasında yapılan ağaç malzemenin sıkıştırılarak yoğunlaştırılması ile ilgili çalışmalar incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Literatürde geçen çalışmalar öz olarak tablo halinde verilmiştir. Sıkıştırılarak yoğunlaştırmada yoğunluk artışına bağlı olarak fiziksel ve mekanik özellikler iyileşmekte, yüzey pürüzlülüğü ve ıslanabilirlik azalmakta, sertlik artmakta, olumsuz bir durum olarak geri esneme meydana gelebilmektedir.

Anahtar kelimeler: Ağaç malzeme, yoğunlaştırma, sıkıştırma

Studies of densification of wood material by compression

Abstract

Wood products industry plays a very important role in the world economy. Wood and wood based materials have long been commonly used for many applications because of their many excellent features. Wood material, having a natural surface image is preferred. However, wood also suffers a number of disadvantages. Wood material can be very soft and weak in use that generally requires high physical and mechanical properties. Densified wood material can be used as an alternative to other structural materials. Due to the increase in environmental sensitivity, new environmentally friendly alternative methods have been developed that protect the wood material against biological degradation and increase its dimensional stability. These; Thermo-Mechanical (TM), Thermo-Hygro-Mechanical (THM), Thermo-Vibro-Mechanical (TVM) densification and Viscoelastic-Thermal-Compression (VTC). Studies on densifying by compressing wood material between 2004-2021 were examined and evaluated in this study. Studies in the literature are given in a table. Physical and mechanical properties improve, surface roughness and wettability decrease, hardness increases, and springback may occur as a negative situation depending on an increase in density by compression.

Keywords: Wood, densification, compression

Makale tarihçesi: Geliş:08.04.2021, Kabul:11.05.2021, Yayınlanma:28.06.2021, *e-posta: sdundar.sofuoğlu@dpu.edu.tr

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Kütahya/Türkiye

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fak., Ağaç İşleri Endüstri Müh. Böl., Simav/Kütahya/Türkiye

Atıf: Tosun, M., Sofuoğlu, S.D., (2021), Ağaç malzemenin sıkıştırılarak yoğunlaştırılması konusunda yapılan çalışmalar, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 4 (1), 91-102, DOI: 10.33725/mamad.911947

1 Giriş

Ağaç malzeme geçmişten günümüze barınma, ulaşım ve sosyal ihtiyaçların karşılanması amacıyla yaygın olarak tercih edilmiştir. Doğadan doğrudan temin edilebilen ve biyolojik olarak devamlılığı olan doğal ve organik bir malzemedir (Aydemir ve Gündüz, 2009). Organik olduğundan dolayı bazı dış faktörler tarafından kolayca zarar görebilmektedir. Dış ortam koşullarında koruyucu işleme tabi tutulmadan kullanılması durumunda fiziksel ve mekanik özelliklerinde olumsuz durumlar meydana gelebilmektedir (Pelit ve Korkmaz, 2019). Ağaç malzemenin bazı olumsuz özelliklerinin giderilmesi için yapılan tüm araştırmalar neticesinde farklı "Ahşap Modifikasyon Yöntemleri" geliştirilmiştir. Ahşap modifikasyonu ahşap malzemenin olumsuz özelliklerini değiştirmek veya iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır (Şenol, 2018; Şenol ve Budakçı, 2016).

Yüksek dayanıklılık, direnç ve sertlik istendiği yapılarıdaki kullanım yerlerinde ağaç malzeme yetersiz gelebilmektedir. Buna karşın yoğunluğu arttırılmış ağaç malzemeler ise yapılarda kullanılan diğer malzemelere alternatif olmaktadır (Blomberg ve Persson, 2004; Homan ve ark., 2000; Kutnar ve Šernek, 2007; Laine ve ark., 2013; Laine, 2014; Pelit ve ark., 2014). Ağaç malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden birisi yoğunluğudur (Blomberg ve Persson, 2004; Kamke, 2006; Kutnar ve Šernek, 2007; Pelit et ark., 2014; L. Rautkari, 2012). Ağaç malzemenin yoğunlaştırılması, mekanik özelliklerini ve sertliğini arttırdığından yoğunlaştırma işlemini geliştirmek için birçok denemeler ve araştırmalar yapılmıştır (J. Blomberg ve Persson, 2004). Ağaç malzemenin yoğunluğu mekanik özellikleri ile pozitif yönde ilişkilidir (Laine, 2014). Yoğunluğu düşük ağaç malzemeler yoğunlaştırma işlemiyle yoğunluğu arttırılmakta ve ticari olarak değeri yükselmektedir. Yoğunluğu yüksek ağaç malzeme türleri ise yoğunlaştırılarak daha dirençli hale getirilebilmektedirler (Blomberg ve ark., 2005; Kutnar ve Šernek, 2007; Pelit ve ark., 2014). Kimyasallar kullanılmadan ağaç malzemenin yoğunlaştırılması işlemi bilinmekle birlikte plastikleşme ve boyutsal kararlılığının yetersiz olmasından dolayı endüstri tarafından uygulanmamıştır (Şenol, 2018).

Son yıllarda çevresel bakış açısının artmasıyla insana ve çevreye zararlı koruyucu malzemelerin kullanımında kısıtlamalar olmuş, ağaç malzemeyi biyolojik bozunmaya karşı koruyan ve boyutsal stabilitesini arttıran çevreye dost yöntemlerin geliştirilmesinin önü açılmıştır (Korkut ve Kocaefe, 2009; Şenol ve Budakçı, 2016). Bu yöntemler; açık bir sistemde sıcaklık ve basınç kullanılarak yoğunlaştırma (Termo-Mekanik (TM)), kapalı bir sistemde sıcaklık, basınç ve buhar kullanılarak yoğunlaştırma (Termo- Hıgro-Mekanik (THM)), buhar ile ön yumuşatma sonrası sıcaklık ve basınç ile yapılan yoğunlaştırma (Viskoelastik-Termal-Sıkıştırma (VTC)) ve sıcaklık, basınç ve titreşim kullanılarak yapılan yoğunlaştırma (Termo-Vibro-Mekanik (TVM)) gösterilebilir (Şenol ve Budakçı, 2016; Şenol, 2018).

Ağaç malzemenin yoğunlaştırılmasında; ağaç türü, pres sıcaklığı ve basıncı, yumuşatma ya da plastikleştirme periyodu en önemli değişkenlerdir (Ulker ve ark., 2012). Normal atmosferik ortamda sıkıştırılmış ağaç malzemenin hücre çeperinde malzemenin doğal elastik yapısına bağlı olarak deformasyon ve çatlaklar oluşmaktadır. Sıkıştırma özellikleri ağaç malzemenin yoğunluğuna, rutubetine, hücre çeperi hacmi ve sıkıştırma yönüne bağlıdır. Sıkıştırılarak yoğunlaştırılan ağaç malzemelerde en önemli olumsuz durum, rutubete veya suya temas ettiğinde geri esneme (spring back) özelliğinden dolayı başlangıç ölçülerine geri dönme eğilimi göstermesidir. Bu olumsuz durum sıcaklık ve buhar etkisi kullanılarak azaltılabilmekte ya da engellenebilmektedir. Son zamanlarda yoğunlaştırılmış ağaç

malzemenin olumsuz taraflarını gidermek için ısı işlem/termal modifikasyon uygulamaları yapılmaya başlanmıştır. Ancak bu uygulamalarda kullanılan 150°C'nin üzerindeki sıcaklık değerleri, ağaç malzemenin rengini, ağırlığını değiştirmekte ve mekanik özelliklerini azaltmaktadır. Bu durum ise ağaç malzemenin taşıyıcı sistemler olarak kullanılmasını zorlaştırabilmektedir (Şenol, 2018).

2 Ağaç Malzemenin Yoğunlaştırılması Konusunda Yapılan Çalışmalar

Ağaç malzemenin yoğunlaştırılma işlemi 1900'lü yılların başında araştırılmaya başlanmış, sıkıştırılmış ahşap ürünler için ilk patent 1900 yılında Sears tarafından, daha sonrasında 1923 yılında Walch ve Watts, 1929 yılında Oleheimer, 1931 yılında Brossmannes, 1934 yılında Esselen, 1934 yılında Olson tarafından alınmıştır (Şenol, 2018; Şenol ve Budakçı, 2016). Sıkıştırılmış masif ahşap 1930'lu yılların başlarında ticari ismi "Lignostone" olarak Almanya'da piyasaya çıkmıştır. Ahşap kaplamaların sıkıştırılması ile elde edilen ve ticari ismi "Lignofol" olan ürün üretilmiştir. Aynı zamanda İngiltere'de benzer tekniklerle ürünler (plywood) üretilmiştir. Ahşap malzemenin yoğunlaştırılması ile ilgili diğer önemli iki yöntem ise, ABD'de Orman Ürünleri Laboratuvarında geliştirilen "Kompreg" ve "Staypak" ticari isimlerindeki ürünlerdir (Atik ve ark., 2013; Şenol ve Budakçı, 2016; Şenol, 2018).

Bazı fiziksel ve kimyasal işlemler ile ağaç malzemenin direnci, sertliği, su iticilik ve boyutsal stabilizasyonu artırılabilir. Bu işlemler; sertleşme sonrası çözünmeyen su bazlı polimerler veya sentetik reçinelerle muamele, hücre çeperi polimerlerinin organik kimyasallar veya çapraz bağlama maddeleri ile bağlanması, ahşap hücre lümenlerinde sıvı monomerlerin polimerizasyonu, ağaç malzemenin sıkıştırılarak veya reçine emdirilerek yoğunlaştırılması ve ısı ile muameledir (Rowell ve Konkol, 1987). Literatür incelendiğinde ağaç malzemenin sıkıştırılarak yoğunlaştırılması işlemi ile ilgili birçok bilimsel çalışma yapıldığı görülmektedir.

Ağaç numuneleri %60 oranında pres ile sıkıştırılmıştır ve görüntü analizi ile plastik gerilmeler incelenmiştir (Blomberg ve Persson, 2004). Ahşap bazlı kompozit malzeme üzerinde yapılan araştırmada malzemeye viskoelastik termal sıkıştırma (VTC) işlemi uygulanmıştır. VTC işlemi, hücre duvarında kırılmalara neden olmadan ahşabın yoğunluğunu arttırdığından mukavemet ve sertliğini arttırmıştır. VTC kompozitin mukavemeti benzer ahşap bazlı kompozitlerden daha yüksektir (Kamke, 2006). Sıkıştırma oranı yüzey sertliğini etkileyen en önemli faktördür. Pres sıcaklığının etkisi önemli olmamıştır. Yoğunlaştırma sonrası numunelerde parlak ve pürüzsüz yüzeyler elde edilmiştir (Lamason ve Gong, 2007). Plastik ve otomotiv endüstrisinde kullanılan titreşim desteği sonucu malzemenin yüzeyinin ısınarak yoğunlaşması esasına dayanan bir metod ahşap için uygulanmıştır. Brinell sertlik yoğunluk oranı ile pozitif korelasyon göstermiştir (Rautkari ve ark., 2009). TH, mekanik ve THM yoğunlaştırma olmak üzere üç farklı işlem uygulanmıştır. Diğer uygulamalara göre THM yoğunlaştırma uygulamasında geri esneme eğilimi görülmemiştir. TH sonrası işlemle birlikte yoğunlaştırma mekanik performansını iyileştirerek ahşabı daha sert ancak daha az elastik hale getirmiştir (Skyba ve ark., 2009). Yüzey yoğunlaştırılmış ahşabın kimyası ve ıslanma davranışı FT-IR spektroskopisi ve temas açısı analizleri kullanılarak incelenmiştir. Önemli bir kimyasal değişiklik olmadığı görülmüştür. Yoğunlaştırılmış yüzeylerin ıslanabilirliği işlem uygulanmamış numunelere göre daha düşük elde edilmiştir (Rautkari ve ark., 2010). TM yoğunlaştırma işleminin uygulandığı çalışmada yüksek sıcaklıklarda ve daha uzun sürelerde yüzey parlaklığında artma meydana gelmiştir. Daha yüksek yoğunlaştırma oranında daha yüksek geri esneme olmuştur. Yüzey sertliğinde artış meydana gelmiştir (Ábrahám ve ark., 2010). Isıl işlem yüzeyi yoğunlaştırılmış numunelerin boyutsal stabilitesini

önemli derecede iyileştirmekle birlikte mekanik özelliklerini az derecede düşürmüştür. Yoğunlaştırıldıktan sonra ısıl işlem görmüş örneklerin mekanik özellikleri, ısıl işlem görmemiş yoğunlaştırılmamış olanlardan daha yüksektir (Gong ve ark., 2010). TM yoğunlaştırma işleminde artan sıcaklıkla birlikte kaplama renginde koyulaşma meydana gelmiş, yüzey pürüzlülüğü 160 ve 200 °C’de arasında azalmıştır (Diouf ve ark., 2011). Düşük sıcaklıklarda yoğunlaştırılan kaplamalarda çok yüksek geri esneme meydana gelmiştir. Yoğunlaştırma sıcaklığı 180°C’den yüksek uygulandığında kaplamalarda geri esneme önemli ölçüde azalmış, 220°C’de neredeyse geri esneme meydana gelmemiştir (Fang ve ark., 2012). Kombine hidro mekanik işlem uygulanmış mantara maruz kalmış numunelerde hidrotermal işlem aşaması yoğunlaştırmaya kıyasla mantar maruzatını önemli ölçüde azaltmıştır (Khademi ve Mohebbi, 2011). Yoğunlaştırma mukavemet özelliklerini arttırmıştır ancak sıcaklıktaki artış mukavemet özelliklerini düşürmüştür (Ulker ve ark., 2012). TM yoğunlaştırma işlemi uygulandıktan sonra renk, ortalama yoğunluk, yoğunluk profili, rutubete bağlı özellikler, kopma modülü ve yüzey sertliği analiz edilmiştir (József ve Németh, 2012). TM yoğunlaştırma sonuçlarına göre denge rutubet miktarı 180°C’de işleme tabi tutulan numunelerde daha düşüktür. Yüzey pürüzlülüğü ve ıslanabilirliği önemli ölçüde azalmıştır (Arruda ve Del Menezzi, 2013). THM yoğunlaştırmada ön testler huş numunelerinde %75’inin, kavak numunelerinin %25’inde kusurlar meydana geldiği görülmüştür. Bu kusurlar THM işlemi sırasında ön işlem süresi artırılarak en aza indirilebilecektir (Ahmed ve ark., 2013). TM olarak modifiye edilmiş kavak ağacının daralma ve stabilitesi başlıklı çalışmada kavak buharlama ve radyo frekansı (RF) ile ısıtılarak işleme tabi tutulmuştur (Gaff ve Gaşparík, 2013). Ağaç numunelerinde yoğunlaştırma sonrasında ısı ile muamele edildiğinde değişen nem miktarında temel davranışları analiz edilmiştir (Kristiina Laine ve ark., 2013). Sıkıştırma oranı ve kapanma süresi, yoğunluk profilinin oluşumunda olduğu kadar sertlik ve elastik geri kazanım üzerinde de en güçlü etkiye sahip olmuştur. Brinell sertliği ve elastik geri kazanım özelliğinin birbiriyle iyi korelasyon göstermiştir (Laine ve ark., 2013). Numuneler yüzey yoğunlaştırma işlemi yapılmış ve ardından hidrotermal işleminden geçirilmiştir (Rautkari ve ark., 2013). Artan sıcaklık ve yoğunlaşma basıncı ile genellikle pürüzlülük değerleri azalma göstermiştir (Bekhta ve ark., 2014). Yoğunlaştırma işlemlerinden sonra örneklerin yoğunluklarında %11’den %38’e kadar, mekanik ve teknolojik direnç özelliklerinde ise %4’den %81’e kadar artışlar sağlanmıştır. Isıl işlem uygulamasından sonra yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliği artarken yüzey parlaklığı azalmıştır (Pelit, 2014). Aynı hedef yoğunlaştırma oranlarında 110°C’de yoğunlaştırılan örneklerde 150°C de yoğunlaştırılanlara göre daha yüksek yoğunlaştırma oranı ve yoğunluk artışı görülmüştür. Isıl işlem sıcaklığındaki artış yoğunlaştırılmış sarıçamda boyutsal stabiliteyi önemli derecede etkilemiştir (Pelit ve ark., 2014). Yoğunlaştırma sonrası radyal ve teğet sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. Isıl işlem sonrası ise numunelerin yoğunluklarında azalma, sertlik değerlerinde düşmeler meydana gelmiştir (Pelit ve ark., 2015). TM yoğunlaştırma ve ısıl işlem uygulandıktan sonra yüzeylerine su bazlı vernik uygulandığında yoğunlaştırılmış numunelerde yüzey pürüzlülüğü azalmış ve parlaklığı artmıştır. Isıl işlem sıcaklığındaki artış yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve parlaklığının azalmasına yol açmıştır (Pelit ve ark., 2015). TM yoğunlaştırma ve ısıl işlem uygulandığında 110°C’de yoğunlaştırılan örneklerin geri esneme oranı düşük ve yoğunluk artışı daha yüksek elde edilmiştir. Sıkıştırma ile yoğunlukta artış, ısıl işlem sonrası azalma olmuştur. Sıkıştırma kalınlığındaki geri dönüş etkisi %83 oranında azalmış ayrıca geri esneme etkisinde %44, sıkıştırma yönündeki şişmede %74 iyileşme sağlanmıştır (Pelit ve Sönmez, 2015). Ahşap kaplamalarda kısa süreli TM yoğunlaştırma işleminde ıslanabilirliğinin değiştiği gözlemlenmiştir. 24 saat sonrasında ıslanabilirlik özelliklerinde değişme olmadığı görülmüştür. Sıcaklığın temas açısı üzerindeki

etkisi belirgindir. Temas açısı ile kütle kaybı arasında doğrusal bir ilişki görülmüştür (Bekhta ve Krystofiak, 2016). Yoğunlaştırma ve ısıtma işlemi uygulanan ağaç malzeme sertlik değerleri yoğunlaştırma oranı ve işlem sıcaklığına bağlı olarak artmıştır. İşlem sıcaklığı arttıkça sertlik negatif yönde etkilenmiştir. SEM analizine göre numunelerin hücre yapısı bozulmuştur (Budakç ve ark., 2016). Yoğunlaştırma yöntemleri incelenmiş, mekanik ahşap modifikasyon yöntemleri, yüzey sertliği, parlaklık, renk, aşınma direnci, rutubet vb. faktörlere etkisi konularında literatür incelenmiştir (Şenol ve Budakç, 2016). Yoğunlaştırma ve ısıtma işlemi tabii tutulan numunelerde yoğunluk, sertlik, eğilme direnci değişimleri belirlenmiştir. Ayrıca toprak altı termitlerine karşı dayanıklılığına etkisi belirlenmiştir. Yoğunlaştırmadan önce ve sonra ısıtma işlemi uygulanması geri esnemeyi azaltmıştır (Esteves ve ark., 2017). Ağaç malzemenin THM yoğunlaştırma işlemi buharın mekanik özellikleri ve boyutsal kararlılığı üzerindeki etkisinin ısının etkisinden daha önemli olduğu görülmüştür. Buharla birlikte yüksek sıcaklık, geri esnemenin azalmasını sağlamıştır (Fu ve ark., 2017). Modifiye edilmiş ağaç malzeme ile üç grup ahşap modifikasyon işlemi incelenmiştir. Bunlar 1. Kimyasal (asetilasyon, furfurilasyon, reçine empenye vb.); 2. Termo-Hidro işleme (ısıtma işlemi); ve 3. Termo-Hidro-Mekanik işleme şeklindedir (Sandberg ve ark., 2017). Yüzey yoğunlaştırma işlemi sertliği ve eğilme mukavemetini arttırmıştır. En yüksek ani geri esneme, en yüksek sıcaklık olan 230°C ısıtma işlemi görmüş numunelerde meydana gelmiştir. Yüzey yoğunlaştırılmış ahşabın elastiklik modülü (MOE) ve kopma modülü (MOR) artan ısıtma işlem sıcaklığı ile azalmıştır (Kariz ve ark., 2017). TVM yöntemi yoğunlaştırma işlemi yoğunluk ve aşınma direncini arttırmıştır (Şenol ve ark., 2017). Pres plakasının sıcaklığının artmasıyla ahşabın maksimum yoğunluğu kademeli olarak artmıştır. TM işlemin süresi ne kadar uzunsa, maksimum yoğunluk alanı ahşap yüzeyden o kadar uzakta elde edilmiştir (Laskowska, 2017). THM yoğunlaştırma işlemi ahşabın kimyasal bileşimini ve fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Daha düşük başlangıç lignin içeriğine sahip (lignin başlangıçta uzaklaştırılmış) yoğunlaştırılmış ağaç malzemelerde sertlik daha yüksek elde edilmiştir (Cruz ve ark., 2018). Yoğunlaştırma için tek işlem yerine kombine Hidro-Termo mekanik teknik uygulandığında ağaç malzemenin yoğunluğu önemli derecede artmış, boyutsal stabilite iyileşmiştir. Mekanik özellikler iyileşmiş, geri esneme azaltılabilmiştir (Hajihassani ve ark., 2018). TM yoğunlaştırma ve ısıtma işlemi sonrası en yüksek yoğunluk artışı 100°C'de elde edilmiştir. Mekanik özelliklerde sıkıştırma oranı ve yoğunluğa bağlı olarak artış meydana gelmiştir. Isıtma işlemi sonrası sıcaklık artışına bağlı olarak mekanik direnç özellikleri azalmıştır (Pelit ve ark., 2018). Yoğunlaştırmada 150°C'de ısıtma işlemi uygulandığında yoğunluk ve mekanik özelliklerde optimum sonuçlar elde edilmiştir (Pertuzzatti ve ark., 2018). Çalışmada yoğunlaştırma ve sonuçları detaylı bir şekilde incelenmiştir (Song ve ark., 2018). TVM yoğunlaştırma presinin tasarlanıp-üretildiği çalışmada TVM işleminin diğer ahşap modifikasyon yöntemlerine alternatif, yeni ve çevreci bir yöntem olacağı tespit edilmiş bu yöntemle ahşap malzemenin fiziksel, mekanik ve teknolojik özellikleri iyileştirilmiştir (Şenol, 2018). Yoğunlaştırma ve TM işlemleri art arda uygulanmıştır. Dayanıklılığın arttığı, mekanik özelliklerde önemli bir değişiklik meydana gelmediği ve malzemenin boyutsal olarak kararlı olduğunu görülmüştür (Wehsener ve ark., 2018). Ahşabın neme bağlı Termo-Mekanik yapı modellenmesi üzerine yapılan çalışmada Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yoğunlaştırma işlemi modellenmiştir (Fleischhauer ve ark., 2019). Yüzey yoğunlaştırma ardından ısıtma işlemi uygulandığında işlem sonrası sıkıştırılmış kalınlığın artmasıyla ahşabın geri esnemesinin azaldığını görülmüştür (Gao ve ark., 2019). Isı, yük ve buhar uygulamasını kontrol eden maliyeti düşük THM yoğunlaştırma işlemi yapılmıştır (Tenorio ve Moya, 2019). TVM yöntemi ile yoğunlaştırılan düşük yoğunluklu ahşap malzemelerde ahşap boyası ve ahşap koruyucu ile ön işlem sonrası parlaklık değeri ve Brinell sertlik değeri artmıştır (Şenol ve

Budakçı, 2019). TM yoğunlaştırma işleminde Brinell sertliği yoğunlaştırma öncesine göre iki kat yükselmiştir (Laskowska, 2020a). Yoğunlaştırılmamış ve yoğunlaştırılmış kayın ve meşe ağacının rengindeki en büyük değişiklikler 20 saatlik ışık ışıması sonrasında meydana gelmiştir. TM işlemin sıcaklığı ne kadar yüksekse ultraviyole radyasyonun etkisi altında toplam renk değişiklikleri o kadar düşük elde edilmiştir (Laskowska, 2020b). Melamin formaldehit emprenye ve sıcak presleme parametrelerinin yoğunlaştırılmış kavak ağacının yoğunluk profili üzerindeki etkisi incelenmiştir (Lykidis ve ark., 2020). Öncesinde delignifikasyon uygulanarak yoğunlaştırılmış ağaç numunelerde kimyasal değişim belirlenmiştir. Huş ağacında lignin %20, selüloz %9.7 ve hemiselüloz %64.9 azalmıştır. Kavakta lignin %34.1, selüloz %13.5, hemiselüloz içeriği %58.0 azalmıştır (Mania ve ark., 2020). TM yoğunlaştırma, laminasyon ve bükme işlemleri birlikte kullanılarak, kavak kaplamalardan yoğunlaştırılmış ve bükülmüş-yoğunlaştırılmış tabakalı kaplama kereste üretilebilirliği incelenmiştir (Özdemir, 2020). Ön ısıtma ile TM yoğunlaştırma ile ahşabın geri esnemesini stabilize etmek ve azaltmak amaçlanmıştır. Numunelerde kararmalar meydana gelmiş, parlaklık azalmış, sarılık ve kızarıklık artmıştır (Tenorio ve ark., 2021). Çizelge 1’de masif ağaç malzemenin yoğunlaştırılması işlemleri konusunda incelenen literatür özet olarak sunulmuştur.

Çizelge 1. Ağaç malzemenin yoğunlaştırılması konusunda son yıllarda yapılan çalışmalar

Çalışma	Yayın yılı	Ağaç türü	Sıcaklık (°C)	Oran (%)	Metot İncelenen özellikler
Jonas Blomberg ve Persson	2004	<i>Pinus sylvestris</i> L.			Görüntü analizi Plastik gerilmeler
Kamke	2006	<i>Pinus radiata</i>	175 200		VTC , Yoğunluk, Elastikiyet modülü,
Lamason ve Gong	2007	<i>Populus tremuloides</i> M.	145	24	TM , Yüzey sertliği, MOE, Çivi tutma direnci
Lauri Rautkari vd.	2009	<i>Picea abies</i>	156- 201		Yoğunluk, sertlik, elastiklik, geri esneme
Skyba vd.	2009	<i>Picea abies</i> <i>Fagus sylvatica</i>	140 160 180		THM , yoğunluk, Brinell sertlik, geri esneme, fiziksel ve mekanik öz.
Lauri Rautkari vd.	2010	<i>Picea abies</i> L. <i>Fagus sylvatica</i> L.			Kimya, optik mikroskop analizi, ıslanabilirlik
J Ábrahám vd.	2010	<i>Populus x euramericana</i> cv. 'Pannonia'	160 180 200	20 30 40	TM , Renk, yoğunluk, yoğunluk profili, sertlik
Gong vd.	2010	<i>Populus tremuloides</i>	145	24	TM+ısıtma işlemi , yoğunluk, Stabilite, mekanik özellikler,
Diouf vd.	2011	<i>Populus tremuloides</i> <i>Populus maximowiczii</i> × <i>P. **Itxbalsamifera</i>	180 200 220	50	THM , renk, pürüzlülük, ıslanabilirlik, kimyasal bileşim,
Khademi Bami ve Mohebbi	2011	<i>Populus deltoides</i> Clone 79/51	160 180	60	CHTM , kütle kaybı
József Ábrahám ve Náneth	2012	<i>Polus x euramericana</i> cv. 'Pannonia'	160 180 200	20 30 40	TM , renk, yoğunluk, yoğunluk profili, elastikiyet modülü, yüzey sertliği
Ulker vd.	2012	<i>Pinus sylvestris</i> L.	120 140 160	50	TM , yoğunluk, mekanik testler, Brinell sertlik
Fang vd.	2012	<i>Populus tremuloides</i> <i>Populus maximowiczii</i> × <i>Populus balsamifera</i>	140 220		Isı, buhar ve basınç Yoğunluk, renk, pürüzlülük, higroskopisite, Brinell sertlik, Mekanik öz., geri esneme
Ahmed vd.	2013	<i>Populus tremula</i> <i>Betula pubescens</i>	200	50	THM , anatomik özellikler
Gaff ve Gašparík,	2013	<i>Populus tremula</i> L.		10-50	TM , Daralma, Stabilite
Kristiina Laine vd.	2013	<i>Pinus sylvestris</i>	150	58	TM , Kalınlığa şişme
K. Laine, Antikainen vd.	2013	<i>Pinus sylvestris</i>	150 200	6,7 25	Brinell sertlik, geri kazanım
Arruda ve Del Menezzi	2013	<i>Trattinnickia burseraefolia</i>	140 180		THM , Yoğunluk, sıkıştırma oranı, ağırlık kaybı, denge rutubet, kalınlığa şişme ve su emilimi, pürüzlülük, ıslanabilirlik

Lauri Rautkari vd.	2013	<i>Pinus sylvestris</i> L.	150		TM , Yoğunluk profili, sertlik, Brinell sertlik
Bekhta vd.	2014	<i>Alnus glutinosa</i> G. <i>Fagus sylvatica</i> L. <i>Betula verrucosa</i> E.	100 150 200		TM , Pürüzlülük, anatomik özellikler
Pelit	2014	<i>Pinus Sylvestris</i> L. <i>Fagus Orientalis</i> L.	110 150	20 40	TM+ısıtıl işlem+vernik , yoğunluk, mekanik özellikler, direnç stabilizasyon, vernik katman öz.
Pelit vd.	2014	<i>Pinus sylvestris</i> L.	110 150	20 40	TM+ısıtıl işlem , Fiziksel özellikler
Pelit vd.	2015	<i>Pinus sylvestris</i> L.	110 150	20 40	TM+ısıtıl işlem , hava kurusu yoğunluk, Brinell sertlik
Pelit, Budakçı, vd.	2015	<i>Pinus sylvestris</i> L.	110 150	20 40	TM+ısıtıl işlem+vernik , pürüzlülük, parlaklık
Pelit ve Sönmez	2015	<i>Fagus Orientalis</i> L.	110 150	20 40	TM+ısıtıl işlem , sıkıştırma oranı, geri esneme, şişme, yoğunluk
Bekhta ve Krystofiak	2016	<i>Alnus glutinosa</i> <i>Fagus sylvatica</i> <i>Betula verrucosa</i>	100 150 200		TM , Temas açısı, Islanabilirlik, kütle kaybı
Budakçı vd.	2016	<i>Abies bornmulleriana</i> Mattf. <i>Tilia grandifolia</i> Ehrh. <i>Populus nigra</i> L.	100 140	25 50	TM+ısıtıl işlem , Janka sertliği ve mikroskopik, SEM analizi
Şenol ve Budakçı	2016				THM, VTC, TM, TVM literatür
Esteves vd.	2017	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	190		Isıl işlem+TM+Isıl işlem , Yoğunluk, sertlik, eğilme, fiziksel ve mekanik öz. termitlere dayanıklılık, geri esneme,
Fu vd.	2017	<i>Acer saccharum</i> Marsh.	180 210		THM , mekanik özellikler, boyutsal kararlılık, ağırlık kaybı
Sandberg vd.	2017				Kimyasal, Termo hidro işleme, THM literatür
Kariz vd.	2017	<i>Picea abies</i> L. Karst	150		Isıl işlem+TM , geri esneme, mekanik öz., Brinell sertliği, yoğunluk profili
Şenol vd.	2017	<i>Abies Bornmülleriana</i> Mattf. <i>Populus nigra</i> L.	100 120 140		TVM , yoğunluk, aşınma direnci
Laskowska	2017	<i>Betula pendula</i> Roth.	100 200		TM , Yoğunluk profili, sertlik,
Cruz vd.	2018	<i>Pinus radiata</i>	180	50	THM , kimyasal bileşim, fiziksel ve mekanik özellikler, renk, FITIR
Hajihassani vd.	2018	<i>Populus deltoides</i>	160	40 60	Kombine THM , yoğunluk, su absorpsiyonu, geri esneme, kalınlığına şişme, mekanik özellikler
Pelit vd.	2018	<i>Abies bornmulleriana</i> M. <i>Tilia grandifolia</i> Ehrh. <i>Populus nigra</i> L.	100 140	25 50	TM+ısıtıl işlem , Mekanik, direnç özellikleri
Pertuzzatti vd.	2018	<i>Pinus elliottii</i> <i>Eucalyptus grandis</i>	150 170 190	50	TM , Yoğunluk, mekanik özellikler
Şenol	2018	<i>Abies bornmülleriana</i> M. <i>Populus nigra</i> L.	100 120 140		TVM+renlendirici+koruyucu , fiziksel, mekanik, teknik özellikler
Song vd.	2018				Kimyasal+TM ve benzer konular, literatür
Wehsener vd.	2018	<i>Populus nigra</i> L. <i>Fagus sylvatica</i> L. <i>Picea abies</i> Karst. <i>Quercus robur</i> L.	130	43 50	TM+ termal modifikasyon , eğilme direnci, statik ve dinamik sertlik, aşınma direnci, rutubet miktarı, boyutsal kararlılık, mantarlara dayanıklılık
Fleischhauer vd.	2019	<i>Fagus sylvatica</i> L.			THM , sonlu elemanlar yöntemi ile analiz
Gao vd.	2019	<i>Populus tomentosa</i>	180		TM+ısıtıl işlem , yoğunluk profili, mekanik öz., geri esneme
Tenorio ve Moya	2019	<i>Vochysia guatemalensis</i>			THM
Şenol ve Budakçı	2019	<i>Abies bornmülleriana</i> <i>Populus nigra</i> L.	120 140		TVM , parlaklık, Brinell sertlik,
Laskowska	2020a	<i>Fagus sylvatica</i> L. <i>Quercus robur</i> L. <i>Pinus sylvestris</i> L.	100		TM , yoğunluk profili, Brinell sertlik
Laskowska	2020b	<i>Fagus sylvatica</i> L. <i>Quercus robur</i> L.	100 150 200		TM , CIE renk değerleri
Lykidis vd.	2020	<i>Populus nigra</i>	150		Emprenve+TM , Yoğunluk profili
Mania vd..	2020	<i>Populus alba</i> L. <i>Betula pendula</i> R.		60 75	Delignifikasyon + TM , setlik, yoğunluk
Özdemir	2020	<i>Populus euramericana</i> cv, <i>Populus deltoides</i>	170	75 100	TM , mekanik özellikler
Tenorio vd.	2021	<i>Alnus acuminata</i> <i>Vochysia ferruginea</i> <i>Vochysia guatemalensis</i>	160 180	55	TM , renk, ağırlık kaybı, geri esneme

3. Sonuç ve Öneriler

Sıkıştırılarak yapılan yoğunlaştırma işlemleri ile ilgili çalışmalar incelendiğinde temel olarak çıkarılabilecek sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Genellikle düşük yoğunluktaki ağaç malzemeler çeşitli yöntemlerle sıkıştırılarak yoğunlaştırılmıştır. Araştırmalarda başlıca Termo-Mekanik (TM), Termo- Hıgro-Mekanik (THM), Viskoelastik-Termal-Sıkıştırma (VTC) ve Termo-Vibro-Mekanik (TVM) yöntemleri uygulanmıştır.
- Sıkıştırılarak yoğunlaştırmada yoğunluk artışına bağlı olarak fiziksel ve mekanik özellikler iyileşmekte, yüzey pürüzlülüğü ve ıslanabilirlik azalmakta, sertlik artmakta, olumsuz bir durum olarak geri esneme meydana gelmektedir. Bunu önlemek için ısıtma işlemi uygulanmakta ancak ısıtma işlemi renk değişikliğine neden olmakta, ağırlığını ve mekanik özelliklerini, pürüzlülüğü ve parlaklığı azaltmaktadır. Araştırmalarda ayrıca yoğunluk profili, FT-IR spektroskopisi, SEM analizleri uygulanmıştır.
- Düşük yoğunluğa sahip ağaç türlerinin yoğunlaştırılması olumsuz olan geri esneme özelliğini ortadan kaldıracak şekilde uygulanmalıdır. Buda ayrıca ısıtma işlemi vb. gibi işlem yapmayı gerektirmektedir. Isıtma işleminin yoğunlaşmadan gelecek olumlu özellikleri minimum derecede etkileyecek şekilde planlanması gerekmektedir.

Kaynaklar

- Ábrahám, J., Németh, R., Molnár, S., (2010), Thermo-mechanical densification of Pannónia poplar, Proc. of the final conference of COST Action E. Vol. 53. 'Quality control for wood and wood products' 4-7. May. 2010, S: 282-292, Edinburgh.
- Ábrahám, J., Németh, R., (2012), Physical and mechanical properties of thermo-mechanically densified poplar, International Scientific Conference on Sustainable Development and Ecological Footprint - 26-27. March. 2012, Sopron/ Hungary.
- Ahmed, S. A., Morán, T., Hagman, O., Cloutier, A., Fang, C. H., Elustondo, D., (2013), Anatomical properties and process parameters affecting blister/blow formation in densified European aspen and downy birch sapwood boards by thermo-hygro-mechanical compression, *Journal of Materials Science*, 48(24), 8571-79. DOI:10.1007/s10853-013-7679-9.
- Arruda, L. M., Del Menezzi, C. H. S., (2013), Effect of thermomechanical treatment on physical properties of wood veneers, *International Wood Products Journal*, 4(4), 217-224. DOI:10.1179/2042645312Y.0000000022.
- Atik, C., Candan, Z., Unsal, O., (2013), Colour characteristics of pine wood affected by thermal compressing, *Ciência Florestal*, 23(2), 475-479.
- Bekhta, P., Proszky, S., Krystofiak, T., Mamonova, M., Pinkowski, G., Lis, B., (2014), Effect of thermomechanical densification on surface roughness of wood veneers, *Wood Material Science and Engineering*, 9(4), 233-245. DOI: 10.1080/17480272.2014.923042.
- Bekhta, P., Krystofiak, T., (2016), The influence of short-term thermo-mechanical densification on the surface wettability of wood veneers, *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 18(1), 79-90. DOI:10.4067/S0718-221X2016005000008.
- Blomberg, J., Persson, B., (2004), Plastic deformation in small clear pieces of Scots pine (*Pinus sylvestris*) during densification with the CaLignum process, *Journal of Wood*

Science, 50(4), 307-314. DOI:10.1007/s10086-003-0566-2.

- Blomberg, J., Persson, B., Blomberg, A., (2005), Effects of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density, *Wood Science and Technology*, 39(5), 339-350.
- Budakçı, M., Pelit, H., Sönmez, A., Korkmaz, M., (2016), The effects of densification and heat post-treatment on hardness and morphological properties of wood materials, *BioResources*, 11(3), 7822-7838. DOI:10.15376/biores.11.3.7822-7838.
- Cruz, N., Bustos, C., Aguayo, M. G., Cloutier, A., Castillo, R., (2018), Impact of the chemical composition of pinus radiata wood on its physical and mechanical properties following thermo-hygro-mechanical densification, *BioResources*, 13(2), 2268-2282. DOI:10.15376/biores.13.2.2268-2282.
- Diouf, P. N., Stevanovic, T., Cloutier, A., Fang, C. H., Blanchet, P., Koubaa, A., Mariotti, N., (2011), Effects of thermo-hygro-mechanical densification on the surface characteristics of trembling aspen and hybrid poplar wood veneers, *Applied Surface Science*, 257(8), 3558-3564. DOI:10.1016/j.apsusc.2010.11.074.
- Esteves, B., Ribeiro, F., Cruz-Lopes, L., Ferreira, J., Domingos, I., Duarte, M., Duarte, S., Nunes, L., (2017), Densification and heat treatment of maritime pine wood, *Wood Research*, 62(3), 373-388.
- Fang, C. H., Mariotti, N., Cloutier, A., Koubaa, A., Blanchet, P., (2012), Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam, *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1-3), 155-163. DOI:10.1007/s00107-011-0524-4.
- Fleischhauer, R., Hartig, J. U., Haller, P., Kaliske, M., (2019), Moisture-dependent thermo-mechanical constitutive modeling of wood, *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, 36(1), 2-24. DOI:10.1108/EC-09-2017-0368.
- Fu, Q., Cloutier, A., Laghdir, A., (2017), Effects of heat and steam on the mechanical properties and dimensional stability of thermo-hygro-mechanically-densified sugar maple wood, *BioResources*, 12(4), 9212-9226. DOI:10.15376/biores.12.4.9212-9226.
- Gaff, M., Gašparik, M., (2013), Shrinkage and stability of thermo-mechanically modified aspen wood, *BioResources*, 8(1), 1136-1146. DOI:10.15376/biores.8.1.1136-1146.
- Gao, Z., Huang, R., Chang, J., Li, R., Wu, Y., (2019), Effects of pressurized superheated-steam heat treatment on set recovery and mechanical properties of surface-compressed wood, *BioResources*, 14(1), 1718-1730. DOI:10.15376/biores.14.1.1718-1730.
- Gong, M., Lamason, C., Li, L., (2010), Interactive effect of surface densification and post-heat-treatment on aspen wood, *Journal of Materials Processing Technology*, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2009.09.013.
- Hajihassani, R., Mohebbi, B., Najafi, S. K., Navi, P., (2018), Influence of combined hygro-thermomechanical treatment on technical characteristics of poplar wood, *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 20 (1), 117-128. DOI:10.4067/S0718-221X2018005011001.
- Homan, W., Tjeerdsma, B., Beckers, E., Jorissen, A., (2000), Structural and other properties of modified wood, World Conference on Timber Engineering, 5, British Columbia.
- Kamke, F. A., (2006), Densified radiata pine for structural composites, *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 8(2), 83-92.

- Kariz, M., Kuzman, M. K., Sernek, M., Hughes, M., Rautkari, L., Kamke, F. A., Kutnar, A., (2017), Influence of temperature of thermal treatment on surface densification of spruce, *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(1), 113-123. DOI:10.1007/s00107-016-1052-z.
- Khademi Bami, L., Mohebbi, B., (2011), Bioresistance of poplar wood compressed by combined hydro-thermo-mechanical wood modification (CHTM): Soft rot and brown-rot, *International Biodeterioration and Biodegradation*, 65(6), 866-870. DOI:10.1016/j.ibiod.2011.03.011.
- Korkut, S., Kocaefe, D., (2009), Isıl işlemin odun özellikleri üzerine etkisi, *Düzce Üniversitesi Ormanlık Dergisi*, 5(2), 11-34.
- Kutnar, A., Šernek, M., (2007), Densification of wood, *Gozdarstva in Lesarstva*, 82, 53-62.
- Laine, K., Antikainen, T., Rautkari, L., Hughes, M., (2013), Analysing density profile characteristics of surface densified solid wood using computational approach, *International Wood Products Journal*, 4(3), 144-149. DOI:10.1179/2042645313Y.0000000031.
- Laine, K., Rautkari, L., Hughes, M., Kutnar, A., (2013), Reducing the set-recovery of surface densified solid Scots pine wood by hydrothermal post-treatment, *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(1), 17-23.
- Laine, K., (2014), *Improving the properties of wood by surface densification*, Aalto University publication series Doctoral Dissertations 133/2014 (Vol. 53, Issue 9). Aalto University publication series, S.59, Finland.
- Laine, K., Belt, T., Rautkari, L., Ramsay, J., Hill, C. A. S., Hughes, M. (2013), Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified Scots pine solid wood, *Journal of Materials Science*, 48(24), 8530–38. DOI:10.1007/s10853-013-7671-4.
- Lamason, C., Gong, M., (2007), Optimization of pressing parameters for mechanically surface-densified aspen, *Forest Products Journal*, 57(10), 64-68.
- Laskowska, A., (2017), The influence of process parameters on the density profile and hardness of surface-densified birch wood (*Betula pendula* Roth), *BioResources*, 12(3), 6011-6023. DOI:10.15376/biores.12.3.6011-6023.
- Laskowska, A., (2020a), Density profile and hardness of thermo-mechanically modified beech, oak and pine wood, *Drewno*, 63(205), 1-16. DOI:10.12841/wood.1644-3985.D06.08.
- Laskowska, A., (2020b), The influence of ultraviolet radiation on the colour of thermo-mechanically modified beech and oak wood, *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 22(1), 55-68. DOI:10.4067/S0718-221X2020005000106.
- Lykidis, C., Moya, R., Tenorio, C., (2020), The effect of melamine formaldehyde impregnation and hot-pressing parameters on the density profile of densified poplar wood, *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(3), 433–40. DOI:10.1007/s00107-020-01515-y.
- Mania, P., Wróblewski, M., Wójciak, A., Roszyk, E., Moliński, W., (2020), Hardness of densified wood in relation to changed chemical composition, *Forests*, 11(5). DOI:10.3390/F11050506.

- Özdemir, S. (2020), *Bükülmüş tabakalı kaplama kereste üretiminde termo-mekanik yoğunlaştırma uygulanması ve mekanik özellikler üzerine etkisi*, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi.
- Pelit, H., (2014), *Yoğunlaştırma ve ısı işleminin doğu kayını ve sarıçamın bazı teknolojik özellikleriyle üstyüzey işlemlerine etkisi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi.
- Pelit, H., Budakçı, M., Sönmez, A., (2018), Density and some mechanical properties of densified and heat post-treated Uludağ fir, linden and black poplar woods, *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(1), 79-87. DOI:10.1007/s00107-017-1182-y.
- Pelit, H., Budakçı, M., Sönmez, A., Burdurlu, E., (2015), Surface roughness and brightness of scots pine (*Pinus sylvestris*) applied with water-based varnish after densification and heat treatment, *Journal of Wood Science*, 61(6), 586–594. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1506-7>.
- Pelit, H., Sönmez, A., (2015), Termo-mekanik yoğunlaştırma ve ısı işleminin doğu kayını (*Fagus Orientalis* L.) odununun bazı fiziksel özelliklerine etkisi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3(1), 1-14.
- Pelit, H., Sönmez, A., Budakçı, M., (2015), Effects of thermomechanical densification and heat treatment on density and Brinell hardness of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Eastern beech (*Fagus orientalis* L.), *BioResources*, 10(2), 3097-3111. DOI: 10.15376/biores.10.2.3097-3111.
- Pelit, H., Sönmez, A., Budakçı, M., (2014), Effects of ThermoWood® process combined with thermo-mechanical densification on some physical properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.), *BioResources*, 9(3). DOI:10.15376/biores.9.3.4552-4567.
- Pertuzzatti, A., Missio, A. L., de Cademartori, P. H. G., Santini, E. J., Haselein, C. R., Berger, C., Gatto, D. A., Tondi, G. (2018), Effect of process parameters in the thermomechanical densification of pinus elliottii and eucalyptus grandis fast-growing wood, *BioResources*, 13(1), 1576-1590. DOI:10.15376/biores.13.1.1576-1590.
- Rautkari, L., (2012), *Surface modification of solid wood using different techniques*. Department of Forest Products Technology, Finland Aalto University, PhD Thesis.
- Rautkari, Lauri, Laine, K., Kutnar, A., Medved, S., Hughes, M., (2013), Hardness and density profile of surface densified and thermally modified scots pine in relation to degree of densification, *Journal of Materials Science*, 48(6), 2370–2375. DOI: 10.1007/s10853-012-7019-5.
- Rautkari, Lauri, Properzi, M., Pichelin, F., Hughes, M., (2009), Surface modification of wood using friction, *Wood Science and Technology*, 43(3-4), 291–299. DOI:10.1007/s00226-008-0227-0.
- Rautkari, Lauri, Properzi, M., Pichelin, F., Hughes, M., (2010), Properties and set-recovery of surface densified Norway spruce and European beech, *Wood Science and Technology*, 44(4), 679–691. DOI:10.1007/s00226-009-0291-0.
- Rowell, R. M., Konkol, P., (1987), *Treatments that enhance physical properties of wood*. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture. Madison, DOI:FPL-GTR-55.
- Sandberg, D., Kutnar, A., Mantanis, G., (2017), *Wood modification technologies - A review*,

IForest, 10(6), 895–908. DOI:10.3832/ifor2380-010.

- Şenol, S., (2018), *Termo- Vibro - Mekanik (TVM)işlem görmüş bazı ağaç malzemelerin fiziksel, mekanik ve teknolojik özelliklerinin belirlenmesi*, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi.
- Şenol, S., Budakçı, M. (2019), Effect of Thermo-Vibro-Mechanic® densification process on the gloss and hardness values of some wood materials, *BioResources*, 14(4), 9611-9627. DOI:10.15376/biores.14.4.9611-9627.
- Şenol, S., Budakçı, M., Korkmaz, M. (2017), Termo-vibro mekanik (TVM) yoğunlaştırma işleminin bazı ağaç malzemelerin yoğunluk ve aşınma direncine etkisi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi Journal*, 263-275.
- Şenol, S., Budakçı, M., (2016), Mekanik odun modifikasyon metotları, *Mugla Journal of Science and Technology*, 2(2), 53–53. <https://doi.org/10.22531/muglajsci.283619>.
- Skyba, O., Schwarze, F. W. M. R., Niemz, P. (2009), Physical and mechanical properties of Thermo-hygromechanically (THM) - Densified wood, *Wood Research*, 54(2), 1-18.
- Song, J., Chen, C., Zhu, S., Zhu, M., Dai, J., Ray, U., Li, Y., Kuang, Y., Li, Y., Quispe, N., Yao, Y., Gong, A., Leiste, U. H., Bruck, H. A., Zhu, J. Y., Vellore, A., Li, H., Minus, M. L., Jia, Z., ... Hu, L. (2018), Processing bulk natural wood into a high-performance structural material, *Nature*, 554(7691), 224-228. DOI: 10.1038/nature25476.
- Tenorio, C., Moya, R., (2019), Development of a thermo-hydro-mechanical device for wood densification adaptable to universal testing machines and its evaluation in a tropical species, *Journal of Testing and Evaluation*, 49, DOI: 10.1520/JTE20180760.
- Tenorio, C., Moya, R., Navarro-Mora, A., (2021), Flooring characteristics of thermo-mechanical densified wood from three hardwood tropical species in Costa Rica. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 23(23), 1–12. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100416>.
- Ulker, O., Imirzi, O., Burdurlu, E., (2012), The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of scots pine (*Pinus sylvestris* L.), *BioResources*, 7(4), 5581–5592. DOI: 10.15376/biores.7.4.5581-5592.
- Wehsener, J., Brischke, C., Meyer-Veltrup, L., Hartig, J., Haller, P., (2018), Physical, mechanical and biological properties of thermo-mechanically densified and thermally modified timber using the Vacu³-process, *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(3), 809–821. DOI:10.1007/s00107-017-1278-4.