

Orman Ürünleri Sanayisinde Sürdürülebilirlik ve Karbon Ayak İzinin Değerlendirilmesi: Kereste Fabrikası Örneği

Sustainability and Carbon Footprint Assessment in the Forest Products Industry: The Case of a Sawmill

Merve CAMBAZOĞLU^{1*}, Sezen COŞKUN², Abdullah SÜTÇÜ¹

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Merkez, Isparta

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Eğirdir Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Eğirdir, Isparta

Eser bilgisi/Article info

Araştırma makalesi / Research article

DOI: 10.17474/artvinofd.1670693

*Sorumlu yazar / Corresponding author

Merve CAMBAZOĞLU

e-mail:

merve.cambazoglu@isparta.edu.tr

Geliş tarihi / Received

06.04.2025

Kabul tarihi / Accepted

20.05.2025

Elektronik erişim / Online available

12.02.2026

Anahtar kelimeler:

Karbon ayak izi

Orman ürünleri endüstrisi

Kereste fabrikası

Sürdürülebilirlik

Keywords:

Carbon footprint

Forest products industry

Sawmill

Sustainability

Özet

Son yıllarda sanayi sektörünün küresel iklim değişikliğine karşı korunması amacıyla karbon ayak izinin belirlenmesi ve azaltılması üzerine çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Orman ürünleri endüstrisi, sürdürülebilir hammadde kullanımına dayansa da üretim süreçleri boyunca belirli seviyelerde sera gazı emisyonu oluşturmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye’de faaliyet gösteren bir kereste fabrikasında üretim süreçlerinin çevresel etkileri değerlendirilerek kereste fabrikasının karbon ayak izi hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında, hammadde tedarikinden nihai ürün elde edilmesine kadar olan aşamalar analiz edilmiş ve emisyon miktarları belirlenmiştir. Karbon ayak izinin hesaplanmasında IPCC Tier 1 metodu kullanılmış ve enerji tüketimi, lojistik faaliyetler ile atık yönetiminin çevresel etkileri incelenmiştir. Çalışmanın bulguları, üretim süreçlerinde karbon emisyonuna neden olan aşamaları ortaya koymakta ve sürdürülebilir üretim uygulamalarına yönelik öneriler sunmaktadır. Üretilen ürün grubunun karbon ayak izi değerleri, profil kereste için 51.89 kgCO₂e/m³-ürün ve inşaatlık kereste için 23.79 kgCO₂e/m³-ürün olarak hesaplanmıştır. Hammadde taşımacılığı (%75.38), elektrik tüketimi (%11) ve odun bazlı atıkların yakılması (%7.02) tesisin toplam karbon ayak izinin en büyük nedenleri arasındadır. Elde edilen sonuçlar, ahşap malzeme işleyen sanayilerde karbon ayak izinin azaltılması için verimli lojistik yönetimi, yenilenebilir enerji kullanımı ve atık geri dönüşüm stratejilerinin önemini vurgulamaktadır.

Abstract

In recent years, efforts to identify and reduce the carbon footprint of the industrial sector have gained great importance in preventing global climate change. Although the forest products industry is based on sustainable raw material utilization, certain levels of greenhouse gas emissions occur throughout the production processes. In this study, the environmental impacts of production processes in a sawmill operating in Türkiye were evaluated and the carbon footprint was calculated. Within the scope of the study, the stages from raw material supply to the final product are analyzed and emission amounts are determined. IPCC Tier 1 method was used to calculate the carbon footprint and the environmental impacts of energy consumption, logistics activities and waste management were analyzed. The findings of the study reveal the stages that cause carbon emissions in production processes and provide recommendations for sustainable production practices. The carbon footprint values of the product groups produced were calculated as 51.89 kgCO₂e/m³-product for profiled timber and 23.79 kgCO₂e/m³-product for construction timber. Raw material transportation (75.38%), electricity consumption (11%) and burning of wood-based residues (7.02%) are among the largest contributors to the facility's total carbon footprint. The results obtained highlight the importance of efficient logistics management, renewable energy use and waste recycling strategies for reducing carbon footprint in wood material processing industries.

GİRİŞ

İklim değişikliği, tatlı su kaynaklarının azalması ve ekolojik dengenin bozulması gibi küresel ısınmanın olumsuz etkileri her geçen gün daha fazla hissedilir duruma gelmiştir. Artan sera gazı emisyonları, küresel ısınmanın en önemli nedenlerinden biri olarak kabul edilmekte ve karbon azaltma stratejileri giderek daha önemli hale gelmektedir (Tellnes ve ark. 2017, Lelieveld ve ark. 2019, Zheng ve ark. 2019). Karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve nitroz oksit (N₂O) emisyonlarını kapsayan karbondioksit eşdeğeri (CO₂e) cinsinden ifade edilen karbon ayak izi (KAİ), bir faaliyet nedeniyle doğrudan ve dolaylı olarak yayılan veya bir ürünün yaşam döngüsü aşamalarında biriken toplam karbondioksit miktarının sayısal bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır (Wiedmann ve Minx 2008, Goodier 2011, Muthu 2016, Coşkun ve Doğan 2021). CO₂ gazının

atmosferdeki etkisinin 1 birim olduğu kabul edilerek, her bir birim sera gazının 100 yıllık zaman diliminde atmosferde yaratabileceği etki de “küresel ısınma potansiyeli” olarak ifade edilmektedir (Gunathilaka ve Gunawardana 2015). CO₂, KAI hesabında dikkate alınan en önemli gazdır ve küresel ısınma potansiyeli, IPCC 5. Değerlendirme Raporuna göre 1 olarak belirtilmektedir (IPCC 2013). Avrupa Birliği (AB) tarafından Kasım 2019'da kabul edilerek yürürlüğe giren Yeşil Mutabakat (European Green Deal), 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarının sıfırlanmasını hedeflemektedir. Böylece emisyonların 2030 yılına kadar en az %55 oranında azaltılması ve 2050'de Avrupa'nın ilk karbon-nötr kıta olması amaçlanmaktadır. Türkiye, elverişli kaynak donanımı, güçlü enerji talebi artışı ve destekleyici hükümet politikaları sayesinde son on yılda yenilenebilir enerji kaynaklarında (özellikle güneş, rüzgâr ve jeotermal) etkileyici bir büyüme yaşamış, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı son on yılda neredeyse üç katına çıkarken toplam elektrik üretimindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı 2019'da %44'e ulaşmıştır. Türkiye, yenilenebilir enerji kaynaklarının genişletilmesini teşvik ederken enerji verimliliğini artıran ve endüstriyel dönüşümü destekleyen uygulamalara da yönelmelidir (IEA 2021).

Avrupa Birliği ile mevcut ticari ilişkiler nedeniyle, Yeşil Mutabakat kapsamında yer alan Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM), Türkiye'nin ihracatçı firmaları üzerinde önemli bir baskı oluşturmaktadır. Bu mekanizma, karbon yoğun ürünlerin AB pazarına girişinde ek maliyetler yaratabileceği için, Türkiye'deki şirketlerin karbon ayak izini azaltmaya yönelik stratejiler geliştirmesini zorunlu hale getirmektedir (Üzer 2023). İklim nötr politikaları, orman ürünleri sektöründe de etkisini göstermektedir. Türkiye İhracatçılar Meclisi (TİM) tarafından 2022 yılında yayımlanan 'Mobilya, Kâğıt ve Orman Ürünleri Sektörü Sürdürülebilirlik Eylem Planı, sektörün sürdürülebilirlik hedeflerini ve stratejilerini belirlemekte, sektörün çevresel etkilerini azaltmaya yönelik önlemleri ve ihracat hedeflerini içermektedir (TİM 2023).

Türkiye'de kereste ve orman ürünleri sektörü inşaat, mobilya, kâğıt ve ambalaj sanayileri gibi alanlara temel hammadde sağladığı için stratejik bir öneme sahiptir. Bu sektör, Türkiye'de imalat sanayine ait katma değerın %2.4'ünü oluşturmaktadır (Kara ve ark. 2019). Orman ürünleri endüstrisi alt sektörleri başta olmak üzere çeşitli sektörel tedarik zincirleri için kerestenin yaygın kullanımı, bu hammaddenin izlenmesi ve yönetilmesi gerekliliğini doğurmuştur (Davey 2018, Sarre ve Davey 2021).

Kereste üretiminde ormandan kesilerek tesise gelen tomruklar kabuk soyma işlemiyle temizlenmekte ardından şerit veya daire testerelerle baş kesme, yan alma ve boyutlandırma işlemleriyle istenilen ebatta kereste üretimi gerçekleştirilmektedir (Wong 2020). Ahşap malzemelerin üretimi sırasında enerji, hammadde temini (motorlu testere gibi ekipmanların kullanılması, tomrukların tesislere taşınmasında yakıt tüketimi) ve imalat aşamasında (kesme, planyalama, kurutma vb.) kullanılmakta ve enerji kaynağına bağlı olarak salınan emisyonlar karbon ayak izini arttırmaktadır (Bergman ve ark. 2014). Pek çok gaz küresel ısınmaya ve karbon ayak izine katkıda bulunsa da CO₂, ahşap malzeme yaşam döngülerinde en önemli sera gazı olarak kabul edilmektedir (Puettmann ve Wilson 2005, Puettmann ve ark. 2010).

KAI'nin hesaplanmasında emisyon kaynakları, kapsam 1, kapsam 2 ve kapsam 3 olmak üzere üç farklı kapsamda raporlanmaktadır. Sahip olunan veya kontrol edilebilen kimyasal üretimden kaynaklanan, fırınlardan ve tesise ait araçlardan kaynaklanan emisyonlar kapsam 1 içerisinde yer almaktadır. Kullanılan elektrik nedeniyle oluşan emisyonlar kapsam 2 içerisinde, şirket tarafından sahip olunamayan veya kontrol edilemeyen kaynaklardan ortaya çıkan dolaylı emisyonlar (atıklar vb.) ise kapsam 3 içerisinde değerlendirilmektedir (Gunathilaka ve Gunawardana 2015, Coşkun ve Doğan 2021). KAI hesaplaması için en yaygın uygulama belgelenmiş emisyon faktörleri (EF) kullanılarak yapılan hesaplama (Gunathilaka ve Gunawardana 2015, Inakollu ve ark. 2017). Ahşap esaslı malzeme üretim tesislerine ait KAI'nin ise genel olarak fosil yakıtların yakılmasından ve satın alınan elektriğin tüketiminden kaynaklandığı bilinmektedir (Minerve Pérez-García 2007).

Ratnasingam ve ark. (2017) kauçuk ağacı işleyen bir kereste fabrikasında yaptıkları çalışmada 1 m³ kereste üretiminin karbon ayak izini 52.9 kgCO₂e/m³ olarak hesaplamış ve üretim prosesinde sera gazı emisyonuna en fazla katkıyı kesme işlemi sırasındaki elektrik tüketiminin neden olduğunu rapor etmiştir. Martínez-Alonso ve Berdasco (2015) kurutma farklılıklarından kaynaklanan karbon ayak izini dikkate aldıkları çalışmada 1 m³ açık havada kurutulmuş kereste ve fırında kurutulmuş kereste için emisyon değerlerini sırasıyla 95.2 kgCO₂e/m³ ve 383.7 kgCO₂e/m³ olarak rapor etmiş, kurutma sırasında harcanan enerjinin karbon ayak izine etkisine dikkat çekmiştir. Ayrıca sera gazı emisyonlarına en önemli katkının kereste fabrikasındaki işleme ve nakliye olduğunu bildirmiştir. Meza-Lopez ve ark. (2021) ikisi aynı firmaya ait üç kereste fabrikasının karbon emisyonunu değerlendirdikleri çalışmada ürün bazlı karbon emisyon değerlerini sırasıyla 70.62 kgCO₂e/m³ (iki üretim tesisi için toplam değer) ve 32.74 kgCO₂e/m³ (üçüncü tesis için) olarak hesaplamış ve tüm tesis hesaplamalarında en yüksek emisyon katkısını kapsam 1'in (%29.32) oluşturduğunu belirtmiştir. Kutnar ve Hill (2014) on dört farklı ahşap bazlı malzemenin karbon emisyonunu araştırdıkları çalışmada, iğne yapraklı ağaç kerestesi üretiminde üretim prosesinin karbon ayak izi değerini 20.7 kgCO₂e/m³ olarak hesaplamışlardır. Kereste fabrikalarından kaynaklanan karbon emisyonları, tesis büyüklüğüne ve enerji verimliliğine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Lin ve ark. 2012, Saud ve ark. 2015). Benzer şekilde kereste fabrikalarının çevresel etkilerinin faaliyet gösterdikleri ülke, fabrikaya ait teknolojik altyapı, çevresel düzenlemeler ve üretim süreçlerindeki farklılıklar nedeniyle değişkenlik gösterdiği ifade edilmektedir (Eshun ve ark. 2010). Berg ve Karjalainen (2003) bu farklılıkları operasyon, teknoloji ve kullanılan yakıt kalitesindeki farklılıklara da bağlamaktadırlar.

Ahşap malzemeler yakıldıklarında veya bozulmaya uğradıklarında atmosferdeki CO₂ ve CH₄ emisyonlarına katkıda bulunmalarına rağmen, hizmet ömürleri boyunca bir karbon tutucu görevi görmekte ve üretim süreçlerinde diğer malzemelere kıyasla daha düşük enerji sarfiyatı oluşturmaktadırlar (Dias ve ark. 2007). Williamson ve ark. (2001) tarafından yapılan karşılaştırmaya göre, yapı malzemeleri arasında kereste, 15 kgCO₂/m³ ile en düşük karbon salımına sahip üründür. Buna karşın, çelik üretimi 5320 kgCO₂/m³, beton üretimi 120 kgCO₂/m³ ve alüminyum üretimi ise 22000 kgCO₂/m³ karbon salımına neden olmaktadır. Ayrıca yalnızca kereste yapısal olarak karbon depolama kapasitesine sahip olup, 1 m³ hacminde yaklaşık 250 kg karbonu biyogenik olarak bünyesinde tutmaktadır. Bu yönüyle kereste, hem düşük emisyon hem de karbon yutak özelliği sayesinde çevresel performansı yüksek bir yapı malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Ancak yine de mevcut çevresel düzenlemeler ve yakın gelecekteki olası yasal zorunluluklar göz önüne alındığında, yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin değerlendirilmesi gerekli görülmektedir. Ülkemizde orman ürünleri sanayisinde faaliyet gösteren işletmelerin karbon ayak izi hesaplamalarına ilişkin sistematik bir envantere ulaşılamamıştır. Ancak yapılan literatür taramasında bu alanda sınırlı sayıda akademik çalışma veya firma bazlı raporlara ulaşılabilmektedir. Örneğin, MDF ve yonga levha üretimi üzerine odaklanan birkaç çalışma kapsamında LCA (Yaşam Döngüsü Analizi) ve KAI hesaplamaları yapılmış olsa da (Erdil ve ark. 2017, Erdil ve Yılğör 2020, Yılmaz 2024) Türkiye genelinde üretim yapan yüzlerce orman ürünleri sanayi işletmesinin çok azı bu tür analizleri çevresel etki beyanı raporu olarak kamuoyuyla paylaşmaktadır. Bu durum, sektörün karbon yönetimi konusundaki kurumsal kapasitesinin henüz gelişme aşamasında olduğunu göstermektedir.

Öte yandan, Dünya Bankası'nın tahminlerine göre, küresel kereste talebinin 2050 yılına kadar dört katına çıkması beklenmektedir (FIM 2017). Bu durum, artan talebinin dünya orman ekosistemleri üzerindeki muhtemel olumsuz etkilerine ilişkin kaygıları artırmaktadır. Dolayısıyla, kereste üretim süreçlerinde, verimliliğinin artırılması, hammadde israfının en aza indirilmesi ve ahşap sektörünün giderek artan çevresel baskılarla sürdürülebilir bir şekilde başa çıkabilmesi için daha derinlemesine akademik incelemelere ve çözüm odaklı stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır (Eshun ve ark. 2012). Bu nedenle mevcut çalışmada, bir kereste fabrikasının üretim aşamalarında oluşan karbon ayak izi değeri hesaplanmış ve üretim prosesindeki emisyon kaynakları belirlenmiştir. Bulgular ışığında ilgili sektör özelinde alınacak önlem ve öneriler geliştirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

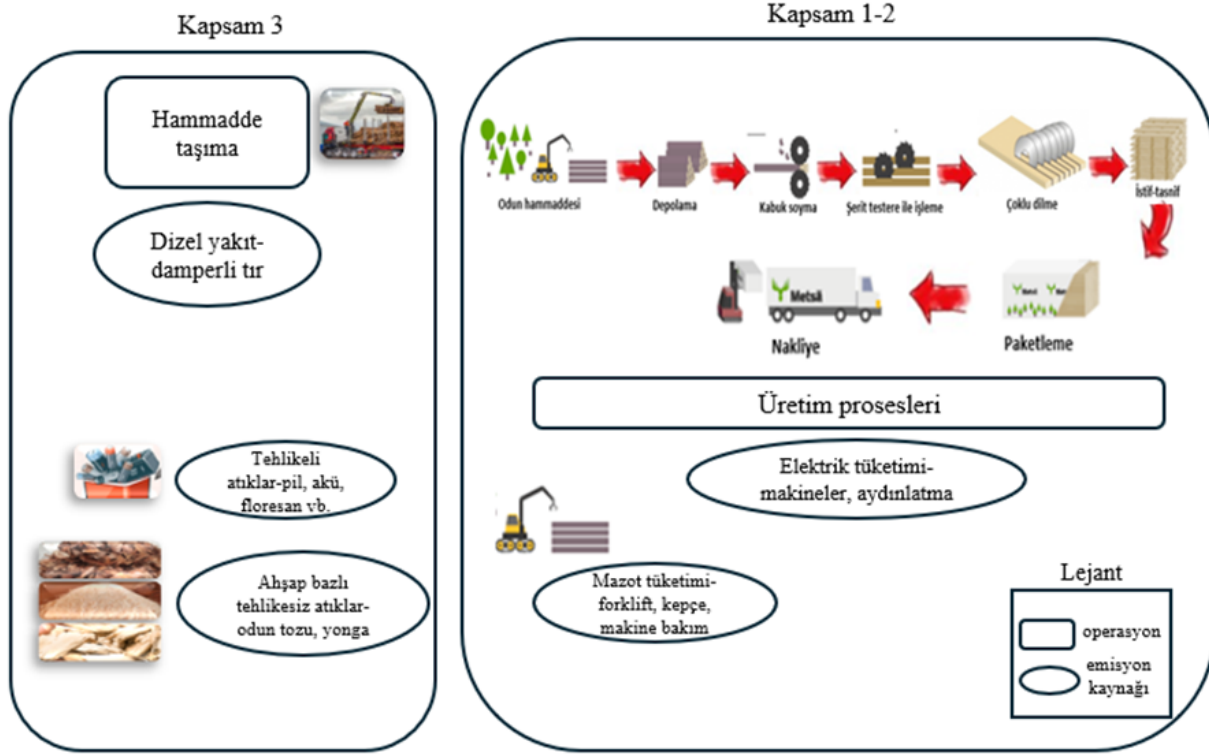
Materyal

Çalışma, Batı Akdeniz Bölgesi'nde 8000 m² kapalı alanda faaliyet gösteren orta ölçekli bir ahşap işleme tesisinde gerçekleştirilmiştir. Yıllık üretim kapasitesi 28750 m³ olan tesiste, 23000 m³ hammadde işlenmekte ve 7 kişi beyaz yakalı olmak üzere toplam 65 kişi istihdam edilmektedir. Tesiste; arabalı çift şerit testere, çoklu dilme makinesi, baş kesme, yan alma, parmak birleştirme, markül, profil makineleri ve kurutma fırını bulunmaktadır. Çalışmanın gerçekleştirildiği tesiste büyük oranda yakın bölge ormanlarından temin edilen kızılçam (*Pinus brutia*) tomruklar işlenmekte, tüketilen kaynakların ürün grupları bazında yüzdelik dağılım oranı %80 profil kereste (PK), %20 inşaatlık kerestedir (İK). Bu nedenle tesis tüketim miktarları (hammadde temini, tehlikesiz atık vb.) belirtilen oranlarda dağıtılarak ayrı ayrı ürün grupları üretimlerinden kaynaklanan KAI hesaplamalarında kullanılmıştır. Elektrik tüketimi (profil kereste %89, inşaatlık kereste %11) ve tesis içi taşımalarda tüketilen motorin miktarı (profil kereste %90, inşaatlık kereste %10) tesis öze linde alınan yüzdelik dağılımlar esas alınarak dağıtılmıştır. Üretim prosesinde işleme sırasında meydana gelen odun esaslı artıkların %24.4'ü (testere talaşı, zımpara tozu vb.) tesiste enerji üretimi için yakılarak kullanılmaktadır. Planya talaşı ve testere talaşından daha kaba olan yonga boyutlu artıklar ile kapak tahtası, yan alma ve baş kesme artıkları ahşap esaslı levha (Yonga Levha, MDF, vb.) üretim tesislerine, ağaç kabukları ise biyokütle üretim tesislerine hammadde olarak satılmaktadır. Tehlikeli atık kategorisinde değerlendirilebilecek atıklar (kontamine olmuş bezler, piller, aküler, vb.) ise lisanslı atık firmalarına teslim edilerek tesisten uzaklaştırılmaktadır. Tesisin yılda 360 gün çalıştığı ve kullanılan tüm araçların dizel yakıt tükettiği dikkate alınmıştır. Nihai ürün miktarının hammadde miktarına oranı (üretkenlik-randıman-productivity) tüm ürün grupları için %80 alınmıştır. Bilindiği gibi; kereste fabrikaları için randıman değeri %40-%65 arasında değişmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde kereste tesisleri için bu oran %42 olarak ifade edilmektedir (Blackwell ve Walker 2006). Çalışmanın yapıldığı, iğne yapraklı ağaç türlerini işleyen bu tesiste kapak tahtası ve baş kesme artığı gibi ürünler ile doğal kusurlar içeren keresteler kusurlarından arındırılarak, parmak birleştirme işlemi ile birleştirilerek sağlam ürün kalitesinde satılabilmekte ve böylece %65 olarak beklenen üretkenlik değeri %80'e kadar yükselebilmektedir.

Tesiste doğalgaz ve kömür kullanılmamaktadır. Tehlikeli atık kamyonunun yılda iki kez atık aldığı ve toplamda 300 km/yıl taşıma yaptığı kabul edilmiştir. Atığın uzaklaştırma maliyetinin üretici firmaya ait olması nedeniyle tehlikeli atıkların lisanslı firma bertaraf tesisine gidene kadar olan ulaşım kaynaklı KAI değeri kereste fabrikası KAI değerine dahil edilmiştir. Ofis kaynaklı karışık ambalaj atıkları yılda bir kez lisanslı evsel atık toplama firması tarafından alınmaktadır. Ofis atıklarının taşıma mesafesinin ve atık miktarının çok düşük olması nedeniyle tesis toplam KAI miktarı için ihmal edilmiştir. Veriler, 2022 yılına ait olup Çizelge 1'de verilmiştir. Tesise ait araçlardan kaynaklanan motorin kapsam 1'de, elektrik tüketimi kapsam 2'de, taşımacılık Meza-Lopez ve ark. (2021)'in belirttiği gibi kapsam 3 içerisinde değerlendirilmiştir. Hammaddenin tesise girişinden nihai ürün oluşumuna kadar geçen tüm süreçlerde meydana gelebilecek enerji kayıpları ihmal edilmiştir. Tesisten elde edilen verilere ait faaliyet ve emisyon kaynaklarının kapsamlara göre gruplandırılması Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Kereste fabrikasına ait emisyon sınıflandırması ve tüketim miktarları

Kapsam	Emisyon Kaynakları	Tüketim Miktarları	Birim	Açıklamalar
Kapsam 1	Motorin	35000	lt/yıl	Tesis içi taşımalar
Kapsam 2	Elektrik	344716	kwh/yıl	Tesis aydınlatması, makinelerin çalışması vb.
	CO ₂ tüpü	15	kg	1 adet 5kg, 1 adet 10 kg
	Tehlikeli atık	2600	kg	Kontamine temizlik bezleri -üstüpü, pil, akü, floresan vb.
Kapsam 3		108000	kg	Ağaç kabuğu
	Tehlikesiz atıklar	132000	kg	Odun tozu
		9600000	kg	Odun yongası- talaş-kapak tahtası vb.
	Taşımacılık	400000	lt/yıl	Hammadde temini



Şekil 1. Tesise ait faaliyetler ve emisyon kaynakları

Yöntem

Çalışmanın gerçekleştirildiği tesiste oluşan karbon ayak izi hesaplamalarında “Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Yaklaşımı” Kapsamında denklem 2.1 ve 2.2’de gösterilen IPCC’nin Tier 1 için önerilen formülleri kullanılmıştır (IPCC 2019, Doğan 2019, Coşkun ve Doğan 2021). Tier 1, sınırlı veri koşullarında uluslararası karşılaştırılabilirlik sağlayan ve literatürde sıklıkla kullanılan geçerli bir yöntemdir (IPCC 2006 2019). Buna karşın, Tier 2 ve Tier 3 yöntemleri, yerel ölçümlere veya proses temelli modellere dayanmaktadır. Bu kapsamda ayrıntılı hesaplama için gereken fabrika içi ölçüm verilerine (baca gazı analizleri, cihaz bazlı enerji tüketimleri vb.) ulaşılamadığından çalışma kapsamında sadece Tier 1 yaklaşımı kullanılmıştır.

Çizelge 2. İlgili emisyon faktörleri ve net kalorifik değerler

Emisyon kaynakları	Emisyon faktörleri (CO ₂ /CH ₄ /N ₂ O)	Emisyon faktörü birimi	NKD (Tj/Gg)	Referans
Motorin	74100/3.9/3.9	kgCO ₂ e/ Tj	43	IPCC 2006
Elektrik	0.442	kgCO ₂ / kWh	-	ETKB 2022
CO ₂ tüpü	0.04	Adet	-	IPCC TEAP 2005
Odun bazlı atık (tehlikesiz)	0.015	kgCO ₂ / kWh	-	DEFRA 2010

$$KAİ = AD \times EF \quad (2.1)$$

$$KAİ = AD \times EF \times NKD \quad (2.2)$$

Denklemlerde, KAİ; elektrik tüketimi, ulaşım, ısınma gibi faktörler nedeniyle tesisten atmosfere yayılan emisyonların CO₂e cinsinden karbon ayak izini, AD (faaliyet verisi); bir proseste üretilen veya tüketilen yakıt gibi maddelere ilişkin veriyi, EF

(emisyon faktörü); bir kirleticinin hacim, kütle, zaman vb. birim değeri baz alınarak elde edilen ortalama emisyon miktarını ve NKD; net kalorifik değeri ifade etmektedir (IPCC 2006, Mutlu ve ark. 2018).

Birim ürün başına karbon ayak izinin hesaplanabilmesi için üretim verisi rakamları her bir üretim hattının üretim kapasitelerine bölünerek formülde faaliyet verisi değeri olarak kullanılmıştır. Faaliyet verileri m³ ürün başına hesaplanmıştır. Çizelge 2’de ilgili emisyon faktörleri ve NKD’ler verilmiştir. Çizelge 2’ye ek olarak ahşap bazlı artıkların yakılmasından kaynaklanan emisyon değerleri ilgili ürünlerin ısı değerleri (odun tozu ısı değeri 4228 kcal/kg) (Uçar 1988) baz alınarak hesaplanmıştır. Motorin tüketiminde ise yoğunluk 0.82 kg/lt BEIS (2022) alınmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Karbon ayak izi için hesaplanan faaliyet verileri Çizelge 3’te verilmiştir. IPCC’nin Tier 1 metoduna göre ürün başına her bir üretim bölümünde karbon ayak izi miktarları hesaplanmış ve Çizelge 4’te verilmiştir. Ürün olarak; inşaatlık kereste kategorisinde muhtelif uzunluklarda ve 50*100; 50*50; 20*100 kalınlıklarında doğal kurutulmuş (%16-%13) keresteler değerlendirilirken, profil kereste olarak çoğunlukla müşteri talebi doğrultusunda muhtelif ölçülerde imal edilen her iki yüzü planlanmış, profil, duvar, taban ya da tavan döşemesi olarak kullanılabilir teknik kurutma yapılmış (<%13) Kızılçam kerestesi ifade edilmektedir. Tesisin tüm faaliyetlerine ait yıllık KAI değerleri (tCO₂e/yıl) ise Çizelge 5’te verilmiştir. Karbondioksittüpü için KAI değeri emisyon faktörleri ile kullanım miktarları çarpılarak (CO₂ tüpü kilogramı x CO₂ tüpü EF’si) hesaplanmıştır. Tehlikeli atıklardan meydana gelen karbon ayak izi değeri ise taşıma mesafesine bağlı motorin tüketimi ve emisyon faktörü çarpılarak (atık kamyonu motorin tüketimi x EF x NKD x motorin yoğunluğu) hesaplanmıştır. Bu veriler, doğrudan üretim proseslerinden kaynaklanmadıkları ve bu nedenle de ürün bazlı KAI’lere direkt eklenmedikleri için faaliyet verileri çizelgesinde yer almamaktadırlar. Tesisin toplam karbon ayak izine ait verilerin bulunduğu Çizelge 5’te tüm kapsamlar ve KAI değerleri verilmiştir.

Kereste fabrikasının üretim hatlarına ilişkin karbon ayak izi değerleri incelendiğinde, profil kereste üretiminin karbon ayak izi 51.89 kgCO₂e/m³ ürün, inşaatlık kereste üretiminin karbon ayak izi 23.79 kgCO₂e/m³ ürün olarak tespit edilmiştir. Profil kereste üretimi kaynaklı karbon ayak izinin inşaatlık kereste üretimine göre fazla olmasının sebebi, tesiste tüketilen kaynakların (enerjinin) ürün grupları bazında yüzdelik dağılım oranlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 3. Faaliyet verileri (AD değerleri)

Faaliyet	Birim	AD (İnşaatlık kereste)	AD (Profil kereste)
Elektrik tüketimi	kWh/m ³	10.30	16.67
Motorin tüketimi (tesis içi)	lt/m ³	0.95	1.71
Taşımacılık (hammadde temini)	lt/m ³	21.73	17.39
Tehlikesiz atıklar (odun bazlı)	kg/m ³	104.02	50.21

Çizelge 4. Kereste fabrikası üretim hatları ürün başına karbon ayak izi değerleri (KAI)

Faaliyet	İnşaatlık kereste (kgCO ₂ e/m ³ -ürün)	Profil kereste (kgCO ₂ e/m ³ -ürün)
Elektrik tüketimi	4.55	7.37
Motorin tüketimi (tesis içi)	2.48	4.47
Taşımacılık (hammadde temini)	9.08	36.35
Tehlikesiz atıklar (odun bazlı)	7.67	3.7
Toplam	23.79	51.89

Özellikle profil kereste ürününün işlenme sürecindeki enerji tüketimi yüksek olduğu için KAI değeri daha yüksek iken, inşaatlık kerestenin daha az işlem görmesi ve düşük enerji yoğunluğu, KAI’nin sınırlı kalmasına neden olmuştur.

Literatürde ahşap malzemelerin karbon ayak izine yönelik yapılmış çalışmalara ait bilgiler (ürün grubu, yöntem, KAİ değeri, sistem sınırları) Çizelge 6’da verilmiştir. Literatürde raporlanan KAİ değerleri ürün türüne, coğrafi konuma, veri kaynaklarına ve özellikle sistem sınırına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Aynı sistem sınırına sahip olan çalışmalar arasında dahi dikkat çekici farklar bulunması, çoğunlukla kullanılan enerji türü, üretim verimliliği ve emisyon faktörlerindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır (Lin ve ark. 2012, Saud ve ark. 2015). Bu çalışmada kullanılan sistem sınırı ormancılık faaliyetlerini değerlendirme dışı tutarken yalnızca hammadde temini (taşımacılık) ve üretim süreçlerini kapsamaktadır. Dolayısıyla, ormancılık süreçlerini dahil eden çalışmalarla yapılan karşılaştırmalarda bu fark metodolojik olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Sistem sınırı ve ürün tipi farkları dikkate alınmadan yapılacak karşılaştırmalar yanıltıcı olabilir. Bu nedenle fonksiyonel birim, sistem sınırı ve ürün özelliklerinin birlikte değerlendirilmelidir.

Üretim hatlarına ait kapsam 1, kapsam 2 ve kapsam 3’ün yüzdelik dağılımları incelenildiğinde her iki proses için karbon ayak izine en büyük katkısı kapsam 3’ün (PK: %77.18, İK: %70.43) yaptığı görülmüştür (Şekil 2).

Çizelge 5. Kereste fabrikası yıllık toplam KAİ değerleri

Kapsam	Faaliyet	KAİ (tonCO ₂ e/yıl)
Kapsam 1	Tesis içi taşımalar	91.44
Kapsam 2	Elektrik tüketimi	152.36
	Hammadde taşımacılığı	1045.106
Kapsam 3	Tehlikeli atık	0.25
	Tehlikesiz atık (odun bazlı)	97.3
	CO ₂ tüpü	0.0006
Toplam		1386.45

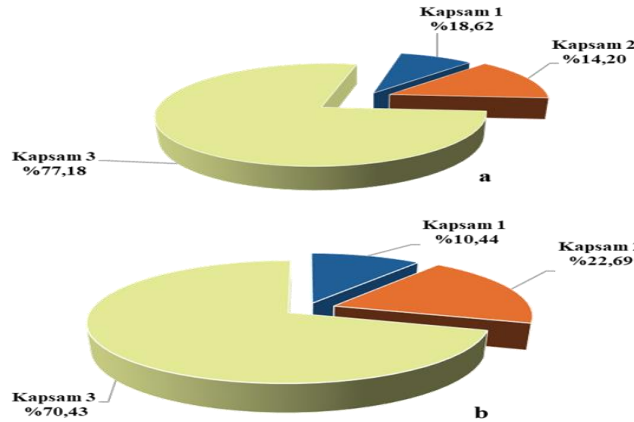
Çizelge 6. Ahşap esaslı malzeme KAİ değerlendirmelerine ait literatür verileri

Referans	Yöntem*	Malzeme Türü**	KAİ (kg CO ₂ e/m ³)	Sistem Sınırı***
McCallum (2009)	LCA	Kereste (İY)	27 – 148	A1-A2-A3
Bergman ve Bowe (2010)	LCI	Kereste (İY)	65.1	A2-A3
Kutnar ve Hill (2014)	IPCC 2001 (GWP100a V1.02)	Kereste (GY)	57	A1-A2-A3
Milota ve Puettmann (2017)	LCI	Kereste (İY)	58.7	A1-A2-A3
Meza-Lopez ve ark. (2021)	IPCC 2006, Tier 1	Kereste (İY)	32.74	A2-A3
Sahoo ve ark. (2021)	LCA	Kereste (İY)	22–65	A1-A2-A3
Khatri ve ark. (2025)	LCI	Kereste (İY)	36–48.4	A1-A2-A3

*LCA: Yaşam Döngüsü Analizi, LCI: Yaşam Döngüsü Envanteri, IPCC: Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli

**İY: İğne Yapraklı, GY: Geniş Yapraklı

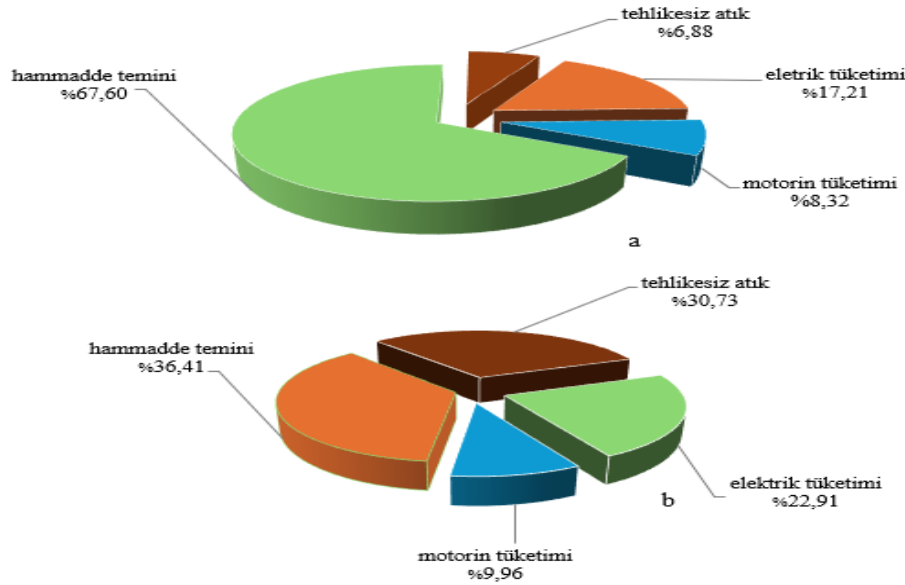
*** A1: hammadde çıkarma (ormancılık operasyonları), A2: hammadde taşımacılığı, A3: üretim süreçleri



Şekil 2. Tesis ürün gruplarına ait karbon emisyonlarının kapsam oranları (a: Profil kereste üretimi, b: İnşaatlık kereste üretimi)

Karbon emisyonuna neden olan faaliyetlere bakıldığında, fosil yakıt kullanımı, satın alınan elektrik tüketimi ve yakma sonucu oluşan emisyon katkısının yüksek olduğu görülmektedir. Literatürde yer alan benzer çalışma sonuçları, ahşap bazlı ürünlerin karbon ayak izinin büyük ölçüde enerji tüketimi, lojistik faaliyetler ve atık yönetimi gibi faktörlerden etkilendiğini ortaya koymaktadır. Werner ve Richter (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, kereste üretiminin karbon ayak izinin büyük ölçüde hammadde lojistiği ve enerji tüketimi ile ilişkili olduğu, üretim sürecinde fosil yakıt kullanımının azaltılmasının önemli bir sürdürülebilirlik stratejisi olduğu vurgulanmıştır. Bu bulgular, incelenen kereste fabrikasındaki üretim proseslerine ait karbon ayak izi verileriyle örtüşmektedir. Ancak, kapsam 3'ün toplam KAI içindeki payının sektörlere ve analiz detayına göre değişebileceği unutulmamalıdır (Huang ve ark. 2009, Downie ve Stubbs 2013).

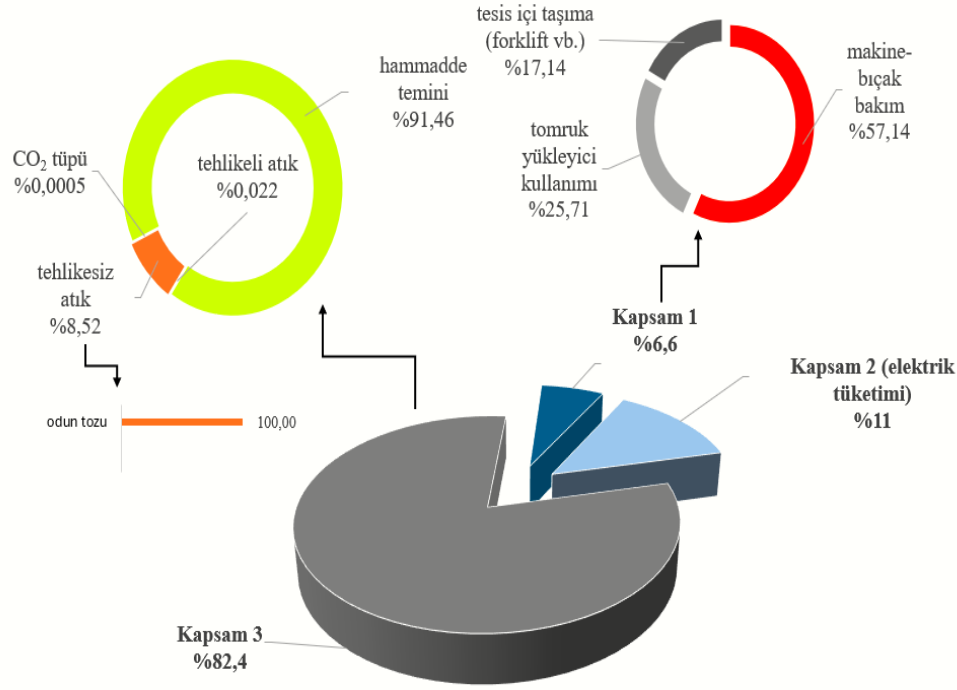
Üretim hatlarına ait KAI yüzdelik oranları Şekil 3'te verilmiştir. Her iki proseste en büyük emisyon kaynağının hammadde temini aşamasında meydana geldiği görülmektedir. Bunu sırasıyla elektrik tüketimi ve tehlikesiz atıklar izlemektedir. Yüksek emisyonu neden olan proseslerde (örneğin taşımacılık) iyileştirmelere yönelik literatürde, karayolu taşımacılığının verimliliğinde ve kapasitesinde yapılacak iyileştirmeler ile ürün düzeyinde önemli emisyon düşüşüne yol açılabileceği, örneğin yüklü kapasitenin %50'den %100'e çıkarılması durumunda kereste tedarik zincirinde %7'lik bir emisyon azaltımının gerçekleştirilebileceği belirtilmektedir (McCallum 2009).



Şekil 3. Tesis ürün gruplarına ait KAI yüzdelik dağılımı (a: profil kereste üretimi, b: inşaatlık kereste üretimi)

Karbon emisyonlarının kapsam oranları incelendiğinde en büyük emisyon oranının kapsam 3'ten (%82.4) kaynaklandığı görülmüştür (Şekil 4). Alvarez ve ark. (2019) benzer bir bulgu rapor etmiştir. İlgili çalışmada, toplam karbon ayak izinin %88'i kapsam 3 emisyonlarına atfedilmiştir. Huang ve ark. (2009) endüstri sektörünün karbon ayak izinin yaklaşık %70'inden fazlasının kapsam 3'ten kaynaklandığını ifade etmektedirler. Benzer şekilde, Lindholm ve Berg (2005) hammadde temininin, tedarik zincirindeki en büyük yakıt tüketim kaynağı olduğundan bahsetmektedirler. Bu bilgiler ışığında çalışmanın bulguları literatür ile benzerlik göstermektedir.

Çalışmanın gerçekleştirildiği tesise ait KAI hesaplamasında Kapsam 3'te yer alan atıkların neden olduğu emisyonlar dikkat çekicidir. Orman ürünleri endüstrisinde faaliyet gösteren tesislerde, sürdürülebilir üretim anlayışının benimsenmesi, atık veya artık yönetiminin etkin bir şekilde yürütülmesini gerektirmektedir.



Şekil 4. Tesise ait toplam karbon emisyonlarının kapsam oranları ve alt emisyon kaynaklarının yüzdelik dağılımları

Çalışmanın gerçekleştirildiği tesiste oluşan odun artıklarının %24,4'ü tesis içi enerji üretiminde kullanılmaktadır. Geri kalan odun artıkları ise ahşap esaslı levha üreten tesislere hammadde olarak satılmaktadır. Bu durumda ilgili tesisin karbon ayak izine katkı bakımından odun artıklarını nispeten çevreci bir yaklaşım ile değerlendirdiği söylenebilir. Diğer yandan, literatürde odun artıklarının geri dönüştürülmesinin çevresel açıdan yakılmasından daha tercih edilir olduğu, ancak farkların dikkate alınacak düzeyde olmadığı belirtilmektedir (Rivela ve ark. 2006b, Yan ve ark. 2010, Bais-Moleman ve ark. 2018). Werner ve ark. (2010) ise bunun aksine, yakma işleminin, geri dönüşümden daha çevreci bir yaklaşım olduğunu, çünkü bu yöntemin, atıkların içindeki kirleticilerin yayılma riskini azalttığını öne sürmüşlerdir.

Ancak Rivela ve ark. (2006a, b) odun artıklarının en uygun kullanımını tanımlamak için çok kriterli bir yaklaşım uyguladıkları çalışmada, çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan orman artıklarının yonga levha üretiminde kullanılmasının yakıt olarak kullanılmasından daha sürdürülebilir olduğu sonucuna varmış ve odun bazlı artıkların yakma prosesinden önce birkaç yaşam döngüsünden geçirilmesini daha çevreci bir uygulama olarak tanımlamışlardır. Bu durum, odun bazlı artıkların yönetim stratejilerinin seçiminde dikkatli bir değerlendirme yapılması gerektiğini göstermektedir.

Tesis içi faaliyetlerde kullanılan ve kapsam 1'de yer alan motorin tüketiminde tesis özelinde dikkat çekici bulgular yer almaktadır (Şekil 4). Yuvarlak odun işleyen birincil imalat sanayilerinde makinelerin tükettiği elektriğin yanı sıra makine bıçaklarının bakım işlemleri için maliyet, zaman ve kaynak tüketimi gerektiği bilinmektedir. İlgili tesiste reçineli ağaç türlerinden kızılçam odunu işlendiğinden, işleme esnasında reçinenin testere levhasına bulaşması ve bunun temizlenmesinde solüsyon görevi görmek üzere motorin kullanıldığı gözlenmiş ve bu uygulama ek bir emisyon arttırıcı olarak değerlendirilmiştir. Petrol esaslı malzemeler ile temizleme yöntemleri yerine ticari olarak satılan biyo-bazlı ürünlerin kullanımı daha çevreci bir yaklaşım olabilir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye’de kızılçam işleyen ve inşaatlık kereste ile teknik kurutulmuş profilli döşeme malzemesi üreten orta ölçekli bir kereste tesisinin KAİ değeri, IPCC Tier 1 yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Ürün grupları değerlendirildiğinde, inşaatlık kereste için KAİ değeri 23.79 kgCO₂e/m³, profil kereste için 51.89 kgCO₂e/m³ olarak tespit edilmiştir.

Yapılan hesaplamalar sonucu her iki üretim hattı için en büyük emisyon kaynağının hammadde temini sürecine ait olduğu görülmüştür. Hammaddenin temin edildiği orman sahası ile fabrika arası mesafenin fazla oluşu ve buna bağlı fosil yakıt miktarının artması bu sonuca neden olmaktadır.

Çalışma kapsamında tesis KAİ’sine ikincil büyük katkı kapsam 2’de yer alan satın alınan elektrik tüketimi kaynaklı karbon emisyonudur. Tesis toplam KAİ’sinin kapsam 1, kapsam 2 ve kapsam 3 yüzdelik etkileri ise sırasıyla %6.6, %11 ve %82.4 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın bulguları ışığında, Orman Endüstri Sektörü genelinde değerlendirildiğinde, çevresel etkilerin azaltılması ve karbon emisyonlarının düşürülmesine yönelik öneriler kısaca şu şekilde ifade edilebilir:

- (1) Üretim süreçlerinde enerji verimli makineler kullanılmalı veya daha düşük enerji tüketen üretim prosesleri değerlendirilmelidir.
- (2) Çam gibi reçineli ağaç türlerini işleyen tesislerde kesici takımlarda-makine aksamalarında meydana gelen reçine bulaşması problemi için mevcutta kullanılan petrol bazlı solüsyonlara alternatif biyo-bazlı solüsyonlar geliştirilebilir.
- (3) Lojistik süreçler optimize edilebilir bu kapsamda; taşımacılık kaynaklı karbon emisyonlarını azaltmak için daha kısa tedarik zincirleri, rota optimizasyonu ve düşük karbonlu nakliye çözümleri (elektrikli taşıma sistemlerine geçiş vb.) terih edilebilir.
- (4) Atık/Artık yönetimi iyileştirilebilir. Bilindiği gibi; atıkların enerji üretimi amacıyla kullanılması, geri dönüşüm veya doğrudan yakma yöntemleri arasında çevresel etkiler açısından belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Bu yöntemlerden hangisinin en uygun olduğu ise, atıkların içerdiği potansiyel kirleticiler, enerji ihtiyacı ve mevcut geri dönüşüm altyapısı (atıkları değerlendirecek ahşap esaslı levha tesislerinin varlığı ve işletmeye olan uzaklığı) gibi faktörlere bağlı olarak değerlendirilmelidir.

Dolayısıyla, sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin belirlenmesinde, her yöntemin uzun vadeli çevresel ve ekonomik etkilerinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi daha uygun olabilecektir. Geliştirilebilir bu gibi öneriler doğrultusunda, ahşap bazlı üretim süreçlerinin daha düşük karbon ayak izine sahip hale getirilmesi ve sürdürülebilir malzeme yönetimi uygulamalarının geliştirilmesi mümkün görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim dalında hazırlanan “Türkiye Orman Ürünleri Endüstrisinin Döngüsel Ekonomi Açısından İncelenmesi” başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

Alvarez S, Tobarra MA, Zafrilla JE (2019) Corporate and product carbon footprint under compound hybrid analysis: application to a Spanish timber company. *Journal of Industrial Ecology*, 23(2): 496-507. <https://doi.org/10.1111/jiec.12759>

Bais-Moleman AL, Sikkema R, Vis M, Reumerman P, Theurl MC, Erb KH (2018) Assessing wood use efficiency and greenhouse gas emissions of wood product cascading in the European Union. *Journal of Cleaner Production*, 172:3942-3954. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.153>

BEIS (2022) Department for Business, Energy Industrial Strategy UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting: Condensed Set 2022. Londra: Birleşik Krallık Hükûmeti. <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2022>.

Berg S, Karjalainen T (2003) Comparison of greenhouse gas emissions from forest operations in Finland and Sweden. *Forestry*, 76(3): 271-284. <https://doi.org/10.1093/forestry/76.3.271>

- Bergman RD, Bowe SA (2010) Environmental impact of manufacturing softwood lumber in northeastern and north central United States. *Wood and Fiber Science*, 42 (1): 67-78.
- Bergman R, Puettmann M, Taylor A, Skog KE (2014) The carbon impacts of wood products. *Forest Products Journal*, 64(7-8): 220-231. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00047>
- Blackwell P, Walker J (2006) Sawmilling. In J. C. F. Walker (Ed.), *Primary Wood Processing: Principles and practice*, Springer: 203-232.
- Coşkun S, Doğan N (2021) Tekstil endüstrisinde karbon ayak izinin belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1): 28-35. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.670336>
- Davey SM (2018) Regional forest agreements: origins, development and contributions. *Australian Forestry*, 81(2): 64-88. <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1458701>
- DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) (2010) 2010 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting: Methodology Paper for Emission Factors. London, UK: DEFRA. Retrieved from <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2010>
- Dias AC, Louro M, Arroja L, Capela I (2007) Carbon estimation in harvested wood products using a country-specific method: Portugal as a case study. *Environmental Science & Policy*, 10(3): 250-259. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.01.002>
- Doğan NA (2019) Kumaş boyama, iplik boyama baskı ve konfeksiyon faaliyetlerinin karbon ayak izi hesabı. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.
- Downie J, Stubbs W (2013) Evaluation of Australian companies' scope 3 greenhouse gas emissions assessments. *Journal of Cleaner Production*, 56:156-163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.010>
- ETKB (2022) 2022 Yılı Üretim ve Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri Raporu. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EVCEd/tr/CevreVeKlim/IklimDeGISikligi/EmisyonFaktorleri/2022_Uretim_Tuketim_FF.pdf Erişim: 28.04.2025.
- Erdil M, Yılgor N, Gungor Y (2017) Evaluation of carbon footprint for wood based panel industry in Turkey. *PressAcademia Procedia*, 5(1):10-18. <https://doi.org/10.17261/Pressacademia.2017.564>
- Erdil M, Yılgor N (2020) An assessment of carbon footprint in medium-density fiberboard (mdf) manufacturing: a case study of wood based panel production in Turkey. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 5(5): 841-848. <https://doi.org/10.35229/jaes.836311>
- Eshun JF, Potting J, Leemans R (2010) Inventory analysis of the timber industry in Ghana. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(7): 715-725. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0207-0>
- Eshun JF, Potting J, Leemans R (2012) Wood waste minimization in the timber sector of Ghana: a systems approach to reduce environmental impact. *J Clean Prod*, 26:67-78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.025>
- FIM (2017) Update on Global Timber Demand. https://greshamhouse.com/wp-content/uploads/2019/10/b559c09a1d19574edfdb71b3KAib249c_dfl1552964b6c5812ba8314ec47e52a42.pdf, Erişim: 15.03.2025.
- Goodier C (2011) Carbon Footprint Calculator. in: Mulvaney D. and Robbins P (Eds.) *Green Technology: An A-to-Z Guide*.
- Gunathilaka LFDZ, Gunawardana KD (2015) Carbon footprint calculation from cradle to grave: a case study of rubber manufacturing process in Sri Lanka. *International Journal of Business and Social Science*, 6(10):82-94.
- Huang YA, Weber CL, Matthews HS (2009) Categorization of scope 3 emissions for streamlined enterprise carbon footprinting. *Environmental Science & Technology*, 43(22): 8509-8515. <https://doi.org/10.1021/es901643a>.
- Inakollu S, Morin R, Keefe R (2017) Carbon footprint estimation in fiber optics industry: a case study of OFS Fitel, LLC. *Sustainability*, 9(5): 865-881. <https://doi.org/10.3390/su9050865>
- International Energy Agency (IEA) (2021) Turkey 2021: Energy Policy Review. IEA. https://iea.blob.core.windows.net/assets/cc499a7b-b72a-466c-88ded792a9daff44/Turkey_2021_Energy_Policy_Review.pdf. Erişim Tarihi: 06.04.2025.
- IPCC (2006) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management. http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_10_Ch10_Livestock.pdf, Erişim Tarihi:14.04.2025.
- IPCC (2013) Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf, Erişim Tarihi:15.04.2025.
- IPCC (2019) Climate Change and Land an IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes In Terrestrial Ecosystems. General Guidance and Reporting. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>, Erişim Tarihi:15.04.2025.
- IPCC TEAP (2005) Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons. Cambridge University Press. <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/sroc/sroc09.pdf>
- Kara O, Şahin Ö, Bekar İ, Kayacan B (2019) Endüstriyel ağaç ve ahşap ürünleri sektörünün uluslararası rekabet gücü analizi: Türkiye örneği. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 15(1): 15-32.
- Khatir P, Loeffler D, Bergman, RD, Nepal P (2025) On-site energy consumption and life-cycle environmental impacts of Sawmills in California. *Forest Products Journal*, 75(2): 95-108. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-24-00040>
- Kutnar A, Hill C (2014) Assessment of carbon footprinting in the wood industry. *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors*, 2: 135-172. <https://doi.org/10.1007/978-981-4585-75-06>
- Lelieveld J, Klingmüller K, Pozzer A, Burnett RT, Haines A, Ramanathan V (2019) Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15): 7192-7197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>
- Lin W, Wang J, Saud P (2012) Assessment of Carbon Emission and Balance from Hardwood Lumber Processing in Central Appalachia. USA. In *Proceedings of the 55th International Convention of Society of Wood Science and Technology*, Beijing, China (pp. 27-31).
- Lindholm EL, Berg S (2005) Energy requirement and environmental impact in timber transport. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 20(2): 184-191. <https://doi.org/10.1080/02827580510008329>.
- Martinez-Alonso C, Berdasco L (2015) Carbon footprint of sawn timber products of *Castanea sativa* mill. in the North of Spain. *Journal of Cleaner Production*, 102: 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.004>
- McCallum D (2009) Carbon Footprint. Nelson Forest Ltd. (http://www.douglasfir.co.nz/resources/CarbonFootprint_2011.10.14.pdf) Erişim tarihi: 10.01.2025.

- Meza-Lopez P, Trujillo-Delgado MK, Burciaga-Alvarez AU, de la Cruz-Carrera R, Nájera-Luna JA (2021) Carbon footprint estimate in the primary wood processing industry in El Salto, Durango. *Estimación de la huella de carbono en la industria de transformación primaria de la madera en El Salto, Durango. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1):127-142. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.07.060>
- Milota M, Puettmann ME (2017) Life-cycle assessment for the cradle-to-gate production of softwood lumber in the Pacific Northwest and Southeast Regions. *Forest Products Journal*, 67(5-6): 331-342. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-16-00062>
- Miner R, Perez-Garcia J (2007) The greenhouse gas and carbon profile of the global forest products industry. *Forest Products Journal*, 57(10): 80.
- Muthu SS (2016) The Carbon Footprint Handbook. Boca Raton, USA: CRC Press.
- Mutlu V, Özgür C, Bekaroğlu ŞŞK (2018) Kauçuk endüstrisinde karbon ayak izinin belirlenmesi. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 2(2): 139-146 <https://doi.org/10.30516/bilgesci.434223>
- Puettmann ME, Wilson JB (2005) Life-cycle analysis of wood products: cradle-to-gate LCI of residential wood building materials. *Wood and Fiber Science*, 18-29.
- Puettmann ME, Bergman RP, Hubbard S, Johnson L, Lippke B, Oneil E, Wagner FG (2010) Cradle-to-gate life-cycle inventory of US wood products production: CORRIM Phase I and Phase II products. *Wood and Fiber Science*, 42(1):15-28.
- Ratnasingam J, Ramasamy G, Ioras F, Parasuraman N (2017) Assessment of the carbon footprint of rubberwood sawmilling in Peninsular Malaysia: challenging the green label of the material. *BioResources*, 12(2):3490-3503. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3490-3503>
- Rivela B, Hospido A, Moreira T, Feijoo G (2006a) Life cycle inventory of particleboard: a case study in the wood sector. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11:106-113. <https://doi.org/10.1065/lca2005.05.206>
- Rivela B, Moreira MT, Muñoz I, Rieradevall J, Feijoo G (2006b) Life cycle assessment of wood wastes: a case study of ephemeral architecture. *Science of the Total Environment*, 357(1-3):1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.04.017>
- Sahoo K, Bergman R, Runge T (2021) Life-cycle assessment of redwood lumber products in the US. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26:1702-1720. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01937-7>
- Sarre AD, Davey SM (2021) The sustainable development goals, forests, and the role of Australian Forestry. *Australian Forestry*, 84(2):41-49. <https://doi.org/10.1080/00049158.2021.1920207>
- Saud P, Wang J, Sharma BD, Liu W (2015) Carbon impacts of hardwood lumber processing in the Northeastern United States. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(12):1699-1710. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0082>
- Tellnes LG, Ganne-Chedeville C, Dias A, Dolezal F, Hill C, Zea Escamilla E (2017) Comparative assessment for biogenic carbon accounting methods in carbon footprint of products: a review study for construction materials based on forest products. *Forest*, 10(5): 815-823. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000516814>
- Türkiye İhracatçılar Birliği Meclisi (TİM) (2023) https://tim.org.tr/tr/Mobilya,Kagit_ve_Orman_Urunleri_Ihracatci_Birlikleri "Sürdürülebilirlik Eylem Planı", Erişim tarihi: 02.02.2025.
- Uçar G (1988) Odun ve orman atıklarının enerji ve kimyasal madde kaynağı olarak değerlendirme olanakları-odun ve benzeri bitkisel biyokütlelerin termik ayrıştırma yöntemleri. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 38(1):76-91.
- Üzer A (2023) AB Yeşil Mutabakatı (CBAM), Karbon Vergisi ve Gümrük İşlemleri. <https://tiud.org.tr/2023/12/24/ab-yesil-mutabakati-cbam-karbon-vergisi-ve-gumruk-islemleri/> Erişim Tarihi: 18.01.2025.
- Werner F, Richter K (2007) Wooden building products in comparative LCA: a literature review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(7):470-479. <https://doi.org/10.1065/lca2006.10.282>
- Werner F, Taverna R, Hofer P, Thürig E, Kaufmann E (2010) National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environmental Science & Policy*, 13(1): 72-85. <https://doi.org/10.1065/lca2006.10.282>
- Wiedmann T, Minx J (2008) A definition of 'carbon footprint'. *Ecological Economics Research Trends*, 1:1-11.
- Williamson TJ, Olweny M, Moosmayer V, Pullen SF, Bennetts H (2001) Environmentally friendly housing using timber-principles. Forest and Wood Products Research and Development Corporation, Australia.
- Wong R (2020) Green possibilities in a green industrial sector: the lumber industry. *Physical Sciences Reviews*, 5(9): 20190025. <https://doi.org/10.1515/psr-2019-0025>
- Yan H, Shen Q, Fan LC, Wang Y, Zhang L (2010) Greenhouse gas emissions in building construction: a case study of One Peking in Hong Kong. *Build. Environ.*, 45:949-955. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.014>
- Yılmaz E (2024) Environmental impact assessment of melamine coated medium density fiberboard (MDF-LAM) production and cumulative energy demand: a case study in Türkiye. *Case Studies in Construction Materials*, 20: e02733. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02733>
- Zheng X, Streimikiene D, Balezentis T, Mardani A, Cavallaro F, Liao H (2019) A review of greenhouse gas emission profiles, dynamics, and climate change mitigation efforts across the key climate change players. *Journal of Cleaner Production*, 234:1113-1133. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.140>