



Derleme Makale-Review Article

Ahşap Plastik Kompozit Malzemelerin Çevresel Sürdürülebilirlik Uygulamaları: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Environmental Sustainability Applications of Wood Plastic Composite Materials: Life Cycle Assessment

Gözde Çolak Bayram¹, Burçin Atılgan Türkmen^{2*}, Gamzenur Özsin³

Geliş / Received: 11/07/2023

Revize / Revised: 09/01/2024

Kabul / Accepted: 09/01/2024

ÖZ

Ahşap-plastik kompozit (APK) malzemeler, çevre dostu alternatifler arayan endüstriler için çok yönlü ve sürdürülebilir bir çözüm sunan malzemeler olarak geliştirilmiştir. Fonksiyonel malzemelerin çevreye olan etkilerini analiz etmek amacıyla uygulanan yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) ise, sürdürülebilirlik kavramının gitgide önem kazandığı günümüzde birçok bilimsel çalışmanın odak noktası haline gelmiştir. Ancak, farklı malzeme gruplarına özgü çevresel sürdürülebilirlik ve yaşam döngüsü değerlendirme araştırmalarını bütünlük bir biçimde özetleyen çalışmalar bulunmakla birlikte, APK özelinde bir derleme çalışmasına literatürde rastlanmamaktadır. Bu kapsamda, APK için hazırlanan YDD çalışmaları kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve bu konudaki güncel literatür bulguları ilk kez derlenmiştir. Bu amaçla, öncelikle YDD'nin temelleri açıklanmış; ardından farklı lignoselülozik biyokütle örnekleri ve polimer birleşimlerinden elde edilen kompozitlerin çeşitli çevresel etki kategorilerindeki sonuçları değerlendirilmiştir. Böylece, APK malzemelerin çevresel sürdürülebilirliğine etki edebilecek parametreler tartışılmıştır. Sonuç olarak, geleneksel malzemelere alternatif olarak kullanılacak APK'lerin üretim süreçlerinde daha sürdürülebilir malzeme ve yöntemler belirlenmiştir. Ayrıca, farklı malzeme kompozisyonları için YDD'nin daha yaygın bir şekilde uygulanmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Güncel literatür verilerinin de desteklediği üzere, bu malzemelerin aynı işleve sahip benzer malzemelere göre daha çevre dostu olduğu sonucuna varılmış; daha sürdürülebilir bir yaklaşım için APK malzemelere yönelik önerilerle makale sonlandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Ahşap, kompozit, polimer, sürdürülebilirlik, yaşam döngüsü değerlendirme

ABSTRACT

Wood-plastic composite (WPC) materials have been developed as a versatile and sustainable solution for industries looking for environmentally friendly alternatives. Life cycle assessment (LCA), which is applied to analyze the environmental impact of functional materials, has become the focus of many scientific studies as the concept of sustainability is becoming increasingly important. However, while there are studies that summarize environmental sustainability and LCA research specific to different material groups in an integrated manner, there is no compilation study specific to WPC in the literature. In this context, the LCA studies prepared for WPCs have been comprehensively reviewed and the current literature findings on this subject have been compiled for the first time. For this purpose, firstly, the basics of LCA are explained and then the results of composites obtained from different

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: burcin.atilganturkmen@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-3220-3817>)

Kimya Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik-Türkiye

¹ İletişim: colak.gozde@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-2170-4838>)

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik-Türkiye

Işıksoy Tekstil, Demirtaş Dumlupınar Organize Sanayi Bölgesi, Bursa-Türkiye

³ İletişim: gamzenur.ozsin@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5091-5485>)

Kimya Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik-Türkiye

lignocellulosic biomass samples and polymer composites are evaluated in various environmental impact categories. Thus, the parameters that can influence the environmental sustainability of WPC materials are discussed. As a result, more sustainable materials and methods have been identified in the production processes of WPCs that can be used as an alternative to traditional materials. Furthermore, the necessity of more widespread application of LCA for different material compositions is emphasized. As supported by the current literature, it is concluded that these materials are more environmentally friendly than similar materials with the same function, and the article is concluded with suggestions for WPC materials for a more sustainable approach.

Keywords- Wood, composite, polymer, sustainability, life cycle assessment.

I. AHŞAP-PLASTİK KOMPOZİT MALZEMELERİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ

En genel tanımı ile “bugünün ihtiyaçlarını, gelecek kuşakların da kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme olanağından ödün vermeksizin karşılayabilmek” şeklinde açıklanan sürdürülebilirlik kavramı malzeme üretim teknolojileri açısından büyük önem arz etmektedir [1]. Malzemelerin sürdürülebilirliği, ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları bir arada bulunduran çok yönlü bir kavramdır. Sürdürülebilirliğin ekonomik boyutu; istihdam oluşturma kapasitesi, üretimde kaynak verimliliği, düşük maliyet, ekonomik büyüme ve atıkların değerlendirilerek yenilenebilir kaynakların kullanımı gibi başlıkları incelerken, çevresel boyutu ise çevrenin korunması ve kaynakların ekosisteme zarar vermeden kullanılmasını konularını ele almaktadır. Sürdürülebilirliğin sosyal boyutunun kapsamı ise, fırsat eşitliği, sağlık ve eğitim dahil olmak üzere temel ihtiyaçların giderilerek kaliteli bir yaşamın toplumsal düzeyde sağlanmasının yanı sıra hak ve özgürlüklerin güvence altına alınmasını da gerektirmektedir [2, 3].

Sürdürülebilir malzemeler, çevreye zarar vermeyen ve üretiminde yenilenemeyen malzemelerin kullanımının sınırlı olduğu yeşil malzemeler olarak tanımlanabilmektedir. Bu tür malzemeler, polimerler ve seramikler gibi biyobazlı malzemelerden yeniden işlenebilen veya yeniden kullanılabilen geri dönüştürülmüş malzemelere kadar çeşitlilik göstermektedir. Sürdürülebilir malzemeler, istenilen hacimde üretilebilirken, üretim ve kullanım süreçlerinde ekosistemi ve insan sağlığını olumsuz etkilemez. Ayrıca bu malzemelerin kullanım ömrü sonunda yeniden kullanılabilmesi ya da yüksek oranda geri dönüştürülebilmesi mümkündür. Kullanım ömrü boyunca ise malzeme seçiminde ekonomik olması, ihtiyaçları karşılaması, kaliteli ve sürdürülebilir olması da tercihi etkilemektedir [4, 5]. Malzemelerin sürdürülebilirliği için hammadde eldesinden üretim, kullanım ve ömrünün sonuna kadar tüm malzeme yaşam döngüsüne bakılmalı ve sürdürülebilirliği analiz etmek için güvenilir ve detaylı verilere dayalı kapsamlı yaşam döngüsü değerlendirmeleri uygulanmalıdır. Bu nedenle, yakın gelecekteki küresel ekonomi hedeflerine ve 2050 yılı net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmek için sürdürülebilir malzemeler üretmek ve kullanmak kilit noktadır [6].

Günümüzde nüfusun hızla artması ve modernleşmeye paralel olarak ahşap-plastik kompozitlere olan talep artmaktadır. Mevcut kaynakların küresel talebi karşılayabilmesine dair çalışmalar ve potansiyel hammaddelerin kullanımının bir zorunluluk haline gelmesi, bu talebin ana nedenlerindedir. Bu nedenle, malzemelerin üretim süreçleri, ürün kullanım ömrü gibi kıstaslar ve sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla malzeme tasarımına yönelik verilerin endüstriyel boyutta izlenmesi gerekmektedir. Geleneksel polimer matrisli kompozitlere kıyasla daha sürdürülebilir ve çevre dostu olduğu düşünülen ahşap-plastik veya ahşap-polimer kompozit (APK) malzemeler, temelde iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bu malzemelerin içeriğinde bulunan ahşap fazı, yani biyokütle, sağlığa zararlı madde içermeyen, yenilenebilir ve fazla atık oluşturmadan üretilebilen doğal bir malzemedir. Bu malzemenin üretiminde kullanılan fosil enerji miktarı düşüktür ve bünyesinde CO₂ depolamaktadır. Ayrıca bu malzeme, genel olarak enerji ve ham madde kullanımı yoğun olmayan işlemlerden geçirilerek kullanılabilir. Hammaddesi biyokütle olan malzemelerin sahip olduğu diğer avantajlar ise ömürleri bitince yeniden kullanılabilirliği, biyolojik yolla bertaraf edilebilmeleri ve enerji veya ham madde olarak değerlendirilebilmeleridir [7, 8]. Ayrıca, biyokütle kaynaklarının tüm dünya çapında mevcut olması ve dolayısıyla temininde bölgesel bağımlılık yaratmaması da endüstriyel süreçlerde bu anlamda büyük bir avantaj olarak göze çarpmaktadır [9]. Polimerik fazda kullanılan makromoleküler yapıdaki malzemeler ise günümüzde artan nüfusun ihtiyacını karşılama konusunda en yaygın kullanılan malzeme türüdür. Polimerlerin farklı uygulamalarda yoğun kullanımları dolayısıyla [10] farklı ekosistemler üzerindeki potansiyel etkilerinin incelenmesi ve çevresel sürdürülebilirliklerinin irdelenmesi konusunda birçok çalışmanın tartışma konusu olmuştur [11-16]. Polimerlerin üretimini genel olarak karmaşık, enerji yoğun ve nispeten ucuz bir süreç olarak tanımlayabilmek mümkündür. Fakat, çoğunlukla tek kullanımlık malzeme üretiminde tercih edilen polimerik malzemeler kullanım ömrünü tamamladıktan sonra doğada yok olmadığından çevre ve insan sağlığını uzun yıllar olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle plastik polimerik malzemenin yeniden kullanımı ya da geri dönüştürülmesi sürdürülebilir üretim için büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, plastiklerin malzemelerin çevresel sürdürülebilirliğini artırmak için, tüketimin azaltılması, iyileştirilmiş geri dönüşüm altyapısı, biyo-esaslı alternatiflerin geliştirilmesi ve plastik kullanımı ve bertarafına ilişkin kamu bilinci ve eğitimi dahil olmak üzere kapsamlı bir strateji izlenmesi de gerekmektedir. Ağırıklı olarak ham petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıt bazlı hammaddelerden elde edilmesi

nedeniyle, bu kaynakların yenilenemez ve sınırlı olması polimerik malzemelerin sürdürülebilirliği konusunda dikkat çeken birincil endişedir. Atık yönetimi açısından bakıldığında ise yanlış atık dönüşüm/bertaraf süreçlerinin uygulanması ekosistemleri ve canlı yaşamını olumsuz yönde etkileyen plastik kirliliğine neden olabilir. Bu polimerik malzemelerin geri dönüşümü genellikle çevresel olarak sürdürülebilir bir çözüm olarak sunulsa bile, uygulanan süreçler beraberinde zorlukları da getirebilir. Örneğin, farklı plastik türlerinin atık toplama esnasında kontaminasyonu, son tüketici farkındalığı eksikliği ve ekonomik uygulanabilirlik gibi kısıtlar geri dönüşümde sürdürülebilirliği etkileyebilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, polimerik malzemeler için döngüsel ekonomi modeline geçiş, uzun vadeli çevresel sürdürülebilirlik için çok önem arz etmektedir. Odaklanılabilecek uygulamalar ise geri dönüştürülebilir ürünler tasarlanması, geri dönüşüm altyapısının oluşturulması, daha çevre dostu ürün tasarımı yoluyla atık oluşumunun en aza indirgenmesi ve yenilikçi geri dönüşüm ve ileri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi sıralanabilmektedir. APK malzemelerin üretimi ile plastik içine ahşap biyokütle kaynağı katılarak atık değerlendirme hedef alınarak katma değere sahip fonksiyonel malzemeler elde edilebilmektedir [17].

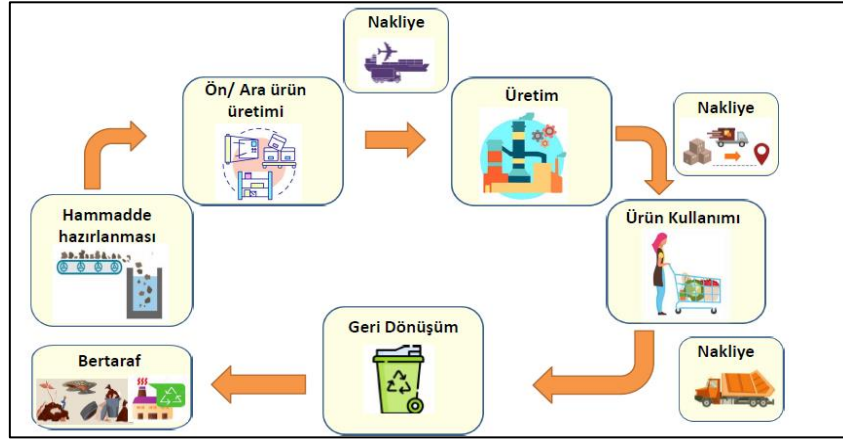
APK malzemelerin üretimi esnasında plastik malzemelerin tekrar kullanılması sağlanarak çevresel etkilerinin önemli ölçüde azaltılabileceği bilinmektedir [18, 19]. APK malzemeler, geleneksel malzemelere fonksiyonel bir alternatif sunmasının yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik açısından da çeşitli avantajlar sunmaktadır. Kompozit yapısında bulunan ahşap bileşeni yenilenebilir biyokütle kaynaklarından elde edildiği için kaynak verimliliğine ve tedarikte sürekliliğe katkı sağlamaktadır. Kompozit yapısındaki bitkisel kökenli ahşap bileşenin ayrıca ağaçların büyümesi sırasında karbondioksiti tutucu olması ise APK malzemelerin, diğer pek çok malzeme gruplarının üretimine kıyasla düşük sera gazı salınımı ile sonuçlandığını göstermektedir [20-22]. Diğer bir deyişle, ahşap biyokütle kaynaklarının yapı içinde kullanımı sadece APK'lerdeki yenilenemeyen malzeme miktarını dengelemenin yanı sıra, atmosferik karbonu tutar ve malzeme çıkarma ve işlemenin enerji kullanımına bağlı iklim değişikliği potansiyelini düşürür [23, 24]. Ürün formülasyonu ve üretim süreçlerinde hammaddelerin dikkatli bir şekilde tedarik edilmesi ve sürdürülebilir üretim uygulamalarına bağlılık gibi kısıtlar da APK malzemelerin çevresel faydalarını en üst düzeye çıkarmak için çok önemlidir. Özellikle yerel kaynaklı biyokütlelerin üretim sürecinde kullanılabilmesi, nakliyeyle ilişkili çevresel etkilerin azaltılarak bölgesel ekonomileri destekleyeceği bilinmektedir [25-27]. Ayrıca geri dönüştürülmüş ahşap parçacıkları ve polimerlerin kompozit yapısına katılarak üretilen APK malzemeler ile kaynakların çok daha verimli bir şekilde kullanılması, aynı zamanda plastik atıkların neden olduğu kirliliğin azaltılmasını ve işlenmemiş malzemelere olan talebi azaltılmasını sağlamaktadır [28, 29]. Özellikle işlenmemiş birincil plastik kullanımının azaltılması ile petrol-esaslı polimerlerin üretim ve işlenmesiyle ilişkili çevresel etkinin azaltılması da polimerik malzemeler yerine APK kullanımı ile mümkündür [30]. APK malzemelerin üretim sonrasında kullanımına bakıldığında ise bu malzemelerin çok yönlülüğü, geleneksel malzemelerin yerini almasına ve birçok endüstride sürdürülebilir alternatifler olarak konumlanması dikkat çekmektedir [31, 32]. Örneğin, APK malzemelerin, sıcaklık, nem ve ultraviyole ışınlarındaki değişiklikler gibi zorlu çevre koşullarına dayanıma olanak sağlayan fiziksel özellikleri, bu kompozitlerin geleneksel malzemelere göre uzun ömürlü ve dayanıklı olmasına yol açmaktadır [33]. Bu nedenle APK malzemeler uygulamalarda sık sık malzeme değiştirme ve bakım ihtiyacını azaltarak zaman içinde daha az malzeme tüketimine yol açar ve dolayısıyla çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğe önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada APK malzemelerin çevresel sürdürülebilirliklerinin karşılaştırılması amacıyla bu malzemeler için yürütülen yaşam döngüsü çevresel etki değerlendirmesi çalışmaları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle sürdürülebilirlik ve yaşam döngüsü değerlendirme kavramları irdelenmiş ve sonrasında ve APK malzemeler özelinde literatür bulguları tartışılmıştır. Böylece, farklı malzeme kombinasyonları ve süreçlerin çevresel etkileri konusunda yapılan çalışmalar derlenerek elde edilen veriler sunulmuştur. Yürütülen bu araştırma ahşap plastik malzemelerin yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkilerinin derlendiği ilk çalışmadır. Kompozit malzemelerin çevresel sürdürülebilirliklerini analiz eden çalışmaların derlenerek irdelenmesi malzemelerin ve üretim sistemlerinin gelecek vizyonunun belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

II. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), tüm yaşam döngüleri boyunca süreçlerin ürünlerin ve hizmetlerin çevresel yüklerini değerlendirmek, raporlamak ve yönetmek için kullanılan bir analiz yöntemidir [14]. Bu yöntem Şekil 1'de gösterildiği gibi ham maddelerin çıkarılmasını ve işlenmesini kapsayan bir ürün, süreç veya sistemin üretim, nakliye ve dağıtım; kullanım, yeniden kullanım, bakım, geri dönüşüm ve nihai bertaraf gibi tüm yaşam döngüsü basamaklarını kapsamaktadır. YDD, yaşam döngüsü düşüncesi doğrultusunda "beşikten mezara" tüm yaşam döngüsü yaklaşımını benimser. Böylece, daha geleneksel analizlerde dikkate alınmayan etkiler de dahil olmak üzere, ürün yaşam döngüsündeki tüm aşamalardan kaynaklanan çevresel etkilerin detaylı ve sistematik bir şekilde analizi sağlanmaktadır [15]. Bu analizde ürün, proses ya da hizmetlerin belirlenen yaşam döngüsü basamakları için kullanılan kaynakların ve üretilen kirleticilerin bir envanteri oluşturulur. Elde edilen çevresel etki sonuçları ise ürün, sistem ya da hizmetin çevresel performansını optimize etmek, yeni ürün ya da süreç tasarımı,

alternatifleri değerlendirmek, eko-etiket ya da ürünlerin çevresel ürün beyanının yapılması için kullanılmaktadır [34, 35].



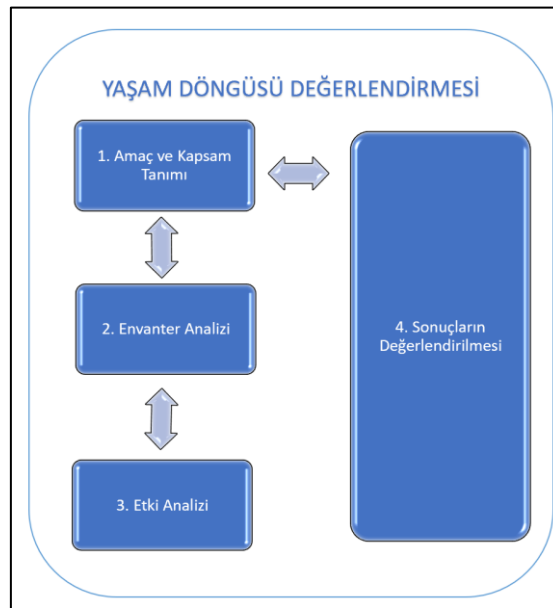
Şekil 1. Yaşam döngüsü basamakları [36].

III. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ METODOLOJİSİ

Yaşam döngüsü değerlendirmesi, ürünlerin, hizmetlerin ve süreçlerin yaşam döngüsündeki çevresel etkileri ölçmek ve analiz etmek için metodolojik bir çerçevedir. YDD metodolojisi, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından oluşturulan Çevre Yönetim Sistemleri ile tanınan 14000 serisi standartları arasında ISO 14040 ve ISO 14044 [37, 38] standartlarına göre tanımlanmıştır. Bu standart serisi, yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarının gerçekleştirilmesine ve bildirilmesine yönelik genel çerçeveyi, prensipleri ve gereklilikleri belirtmektedir.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemi Şekil 2’de gösterildiği gibi aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır [39]:

- Amaç ve kapsam tanımı
- Envanter analizi,
- Etki değerlendirmesi,
- Sonuçların değerlendirilmesi.



Şekil 2. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Metodolojisi [37, 38]

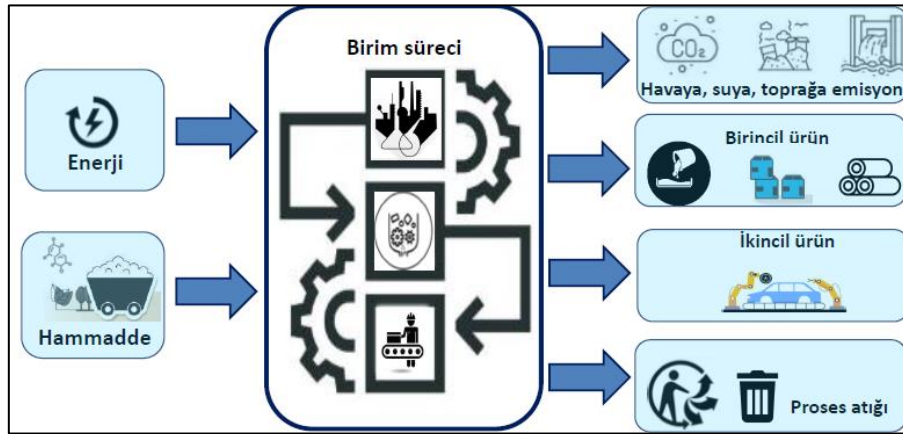
A. Amaç ve kapsam tanımı

YDD'nin ilk aşamasında çalışmanın amacı, kapsamı, sistem sınırları ve detay düzeyi tanımlanmaktadır. Çalışmanın kapsamı tanımlanırken sistem ve sınırları, veri ihtiyaçları ve tahminler belirtilir. Sistem sınırı, hangi basamakların sistem içerisinde değerlendirileceğini tanımlar. Ayrıca YDD çalışmasındaki bir ürünün işlevinin nicelik olarak belirtilmiş tanımı olan fonksiyonel birim bu basamakta belirlenmektedir [39, 40].

Kompozit malzemeler için yaşam döngüsü değerlendirme çalışmalarında, fonksiyonel birim, değerlendirmenin referans birimini tanımlayan kritik bir parametredir. Fonksiyonel birim, çalışılan ürün veya sistemin performansının veya işlevinin bir ölçüsüdür ve farklı alternatiflerin karşılaştırılması için bir temel sağlamaktadır [41]. Seçilebilecek fonksiyonel birim, hedeflenen uygulama alanına bağlı olarak APK malzemesinin ağırlığına, hacmine, kullanım özelliklerine veya yüzey alanına bağlı olabilir. Ayrıca, fonksiyonel birim tanımlarken APK'nın beklenen ekonomik ömrünü de dikkate almak, malzemenin tüm yaşam döngüsü boyunca performansını doğru bir şekilde yansıtmayı sağlamaktadır. Ayrıca, ürün kalitesindeki oluşabilecek olası değişiklikler veya kompozit malzemenin zaman içindeki uygulamasındaki değişiklikler gibi fonksiyonel birimdeki herhangi bir değişkenliği hesaba katmak da önem arz etmektedir [11, 42, 43].

B. Envanter analizi

YDD'nin ikinci aşaması envanter analizidir. Bu basamak veri toplama ve hesaplama prosedürlerini içerir. Bu veriler çalışmanın temeli olacağından bu basamak kilit öneme sahiptir. Verilere bağlı olarak sistem sınırları değiştirilebilir ya da yeniden tanımlanabilir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, envanter analizinde çevreden gelen tüm girdilerin (su, enerji ve hammadde gibi) sınırdan sisteme akışının ve sistemden tüm çıktılarının (ürün, yan ürün, enerji, hammadde, emisyon ve atık gibi) sınırdan çevreye akışı dikkate alınır. Yaşam döngüsü envanteri aşamasında hedef ve kapsam tanımlama aşamasında tanımlanan sistem sınırlarına göre akış şemasının oluşturulması, fonksiyonel birime bağlı olarak tüm birim süreçleri için veri toplama ve sistemin çevresel yükünün hesaplanması gerçekleştirilir [19].



Şekil 3. Bir birim sürecin girdi ve çıktılarını gösteren yaşam döngüsü envanterinin şematik gösterimi [44].

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde envanter analizi basamağında sonuçlarının güvenilirliğini ve geçerliliğini doğrudan etkilediği için veri kalitesinin ve doğruluğunun gözden geçirilmesi son derece önemlidir [42]. Verilerin güncel olması, güvenilir kaynaklardan elde edilmesi ve mümkünse doğrudan toplanan ya da ölçülen değerlerin oluşturduğu birincil verilerin kullanımı esas alınmalıdır. Ancak birincil verilere erişilememesi durumunda bilimsel saygınlığı kanıtlanmış veri tabanlarından veya yayınlarda gelen ikincil verilerde kullanılabilir. Ayrıca, yürütülecek çalışma ile ilgili konum ve zamana bağlı faktörlerin de veri toplarken göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu noktada önemli değişimleri veya nüansları belirlemeyi engelleyebilecek, aşırı derecede genelleştirilmiş veya toplu verilerin kullanımından kaçınmak da diğer bir önemli husustur. Veri tutarlılığı açısından ve hesaplamalardaki hataları önlemek ve en aza indirmek için ise ölçüm birimleri gibi verilerin kesinliğinin sağlanması da gerekmektedir.

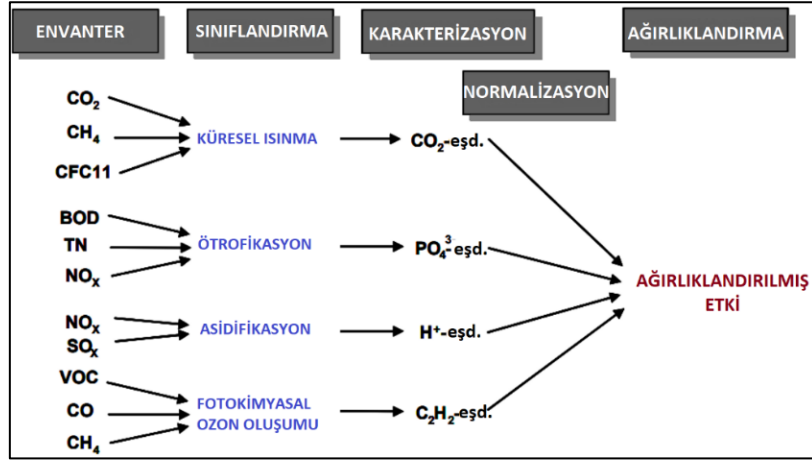
C. Etki Değerlendirmesi

Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi basamağında envanter analizine dayalı olarak elde edilen enerji, su ve hammadde kullanımı verilerinin potansiyel çevre etkileri değerlendirilmektedir. Bu basamak ilk olarak emisyonları etki kategorilerine ayıran ve ikinci olarak karşılaştırmaya olanak sağlamak için bunları ortak birimlerle karakterize eden çevresel etki değerlendirme yöntemleri aracılığıyla yapılır [45].

Yaşam döngüsü çevresel etki değerlendirmesi hesaplamaları günümüzde sıklıkla GaBi, OpenLCA ve SimaPro gibi yazılımlar kullanılarak yapılmaktadır. Bazı yazılımlar kendi veritabanlarıyla birlikte

kullanılabilirken Ecoinvent, NEEDS gibi küresel ve ülkelere özel hazırlanan veri tabanları ile de desteklenmesi gerekebilmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirme için kullanılan yazılımların birçoğu yaşam döngüsü maliyetlendirmesi ve yaşam döngüsü raporlamasını da gerçekleştirmektedir. CML, ReCiPe, gibi değişik yaşam döngüsü etki değerlendirme yöntemi mevcuttur. Farklı yöntemler genellikle farklı sonuçlar verir, bu da YDD uygulayıcısının en uygun yöntemi seçmesini ve hangi sonuçların en iyi veya en olası etki tahminini verdiğini belirlemesini karmaşık hale getirmektedir. Bu yöntemler çeşitli açılardan farklılık gösterse de temel ayrımlardan biri orta nokta ve son nokta yöntemleri arasındadır. Bu yöntemler, etkiyi hesaplamak için neden-sonuç zincirindeki farklı aşamaları kullanmaktadır [46].

Şekil 4'te gösterildiği gibi etki değerlendirmesi sınıflandırma, karakterizasyon, normalleştirme ve ağırlıklandırma gibi basamaklardan oluşur. Her çalışma için farklılık göstermekte olup ilk iki aşama zorunlu, son iki aşama ise isteğe bağlıdır [47].



Şekil 4. Etki analizi basamakları ve ilişkisi [47]

Sınıflandırma, yaşam döngüsü envanter girdi ve çıktılarının çalışma amacına uygun olarak seçilen etki kategorilerine ayrılmasıdır. Örneğin, sınıflandırma aşamasında, sera gazı neden olan tüm girdiler/çıktılar iklim değişikliği etki kategorisine atanır [39]. YDD'de en yaygın olarak dikkate alınan çevresel etkiler kaynak kullanımı, insan sağlığı ve ekolojik hususlarla ilgili olup aşağıda listelenmiştir. Bu liste küreselden yerele doğru etki ölçeği sırasına göre düzenlenmiştir [48].

- Abiyotik ve biyotik kaynakların tükenmesi
- Küresel ısınma
- Ozon tabakasının incelmeye
- Fotokimyasal ozon oluşumu veya duman oluşumu
- Asitleşme
- Ötrofikasyon
- İnsan toksisitesi
- Ekotoksosite
- Katı atık, tehlikeli ve radyoaktif atıklar

Karakterizasyon, her envanter akışının ilgili çevresel etkisine yönelik potansiyel etkilerinin büyüklüğünün değerlendirilmesidir. Örneğin, iklim değişikliği etkileri hesaplanırken, yaşam döngüsü envanter analizinde daha önce envanteri çıkarılan tüm sera gazı emisyonları, karbondioksite göre etki yoğunlukları açısından ağırlıklandırılır ve kg CO₂ eşdeğeri olarak ifade edilir. Karakterizasyon aşamasında envanter analizinde hesaplanan yükler, her bir yükün uygun etki kategorilerine nicel katkısını belirlemek için bir karakterizasyon faktörü ile çarpılır. Karakterizasyon faktörleri maddeye veya kaynağa özgüdür [46, 48].

Normalleştirme aşamasında, farklı çevresel etki potansiyelleri, kabul görmüş normalizasyon yöntemleri kullanılarak ortak referans sistemine göre birimsiz hale getirilerek karşılaştırılır. Etkiler, belirli bir zaman diliminde belirli bir alandaki toplam etkilere göre de normalleştirilebilir [49]. Ancak, yerel ve bölgesel ölçekte bazı etki kategorilerinin (örneğin insan toksisitesi, asitleşme) göreceli katkıları küresel ölçekteki toplam etkiye (örneğin küresel ısınma, abiyotik tükenme) kıyasla çok daha küçük ve bazen ihmal edilebilir görünebileceğinden normalleştirme sonuçları dikkatle yorumlanmalıdır [39, 50, 51].

Ağırlıklandırma aşamasında ise hangi çevresel etki potansiyelinin daha önemli olduğu ortaya koyulur. Bu basamakta her çevresel etki kategorisi için azaltım hedeflerine dayanan ağırlıklandırma yöntemlerinden biri kullanılarak belirli katsayılarla çarpılır [48]. Ağırlıklandırma, analiz sonuçlarının yorumlanmasını ve iletişimini destekler.

D. Sonuçların Değerlendirilmesi

YDD'nin son aşaması sonuçların değerlendirilmesidir ve bu basamağın amacı sonuçları analiz etmek, veri hassaslık analizini değerlendirmek, en fazla etkinin geldiği basamakların bulunması ve sonuçların raporlanmasıdır. Bu aşamada aynı zamanda bir YDD veya bir yaşam döngüsü envanteri çalışmasının sonuçlarının çalışmanın amaç ve kapsam tanımına uygun olarak, kolayca anlaşılabilir, eksiksiz ve tutarlı bir sunumu sağlar [39, 52].

APK malzemeler için bir YDD çalışmasının sonuçlarını yorumlarken dikkate alınması gereken bazı önemli noktalar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. YDD'de sonuçların yorumlanmasında kullanılması gereken yaklaşımlar [49].

Yöntem	Amaç
En çok etkinin geldiği noktaların belirlenmesi	Detaylı, sayısal ve karşılaştırmalı veriler ile malzemenin yaşam döngüsü ile ilişkili sera gazı emisyonları, su kullanımı veya toksik salınımlar gibi çevresel etkilere en çok sebep olan basamakların tespit etmek.
Alternatif hammaddelerin ve üretim sürecinin kıyaslanması	İncelenen kompozit malzemenin çevresel sürdürülebilirliğinin, kompozit içindeki bileşenler ve diğer alternatif malzemeler ile karşılaştırmak. Farklı tasarım seçeneklerini tespit ederek, iyileştirme fırsatlarını belirlemek.
Modeldeki belirsizliklerin, varsayımların ve sınırlamaların değerlendirilmesi	Envanter analizinde veya etki değerlendirmesinde yapılan varsayımları, veri kalitesini ve model belirsizliklerinin sonuçlar üzerindeki değişimini yorumlamak.

IV. AHŞAP PLASTİK KOMPOZİTLERİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ: GÜNCEL LİTERATÜR ÖRNEKLERİ

YDD, tüm dünyada kullanılan, sürekli gelişmekte olan, asıl ürünleri hedef alan ve standardize edilmiş bilimsel bir analiz metodudur [53]. YDD çok çeşitli ürün, hizmet ve sistemler için geniş uygulama alanına sahiptir [49] ve kompozit malzemelerin yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkilerinin analiz edildiği çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen ahşap ve plastik temelli kompozit malzemeler için yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarına ait bilgiler **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**2'de sunulmuştur. Çalışmalar değerlendirildiğinde, kullanılan hammadde türü, çalışma kapsamı ve amacı, fonksiyonel birim ve odaklanılan çevresel etki kategorilerine göre farklılık gösterdiği görülmüştür. Genel olarak tek kompozit malzemenin çevresel etkileri hesaplanırken, bazı çalışmalarda [54-56] alternatif hammaddelerle üretilen APK malzemelerin çevresel etkilerinin karşılaştırıldığı görülmüştür. Fonksiyonel birim genel olarak ağırlığa bağlı seçilirken APK malzeme alanına [56, 57] ve kullanımına [58] bağlı seçilen fonksiyonel birime göre hesaplamaların yapıldığı çalışmalar da literatürde mevcuttur. Bütün çalışmalarda küresel ısınma potansiyeli (KIP) hesaplanmıştır. Sadece iki çalışmada [59, 60] asidifikasyon potansiyeli (AP) ve üç çalışmada [59-61] ötrofikasyon potansiyeli (ÖP) hesaplanmamıştır. Diğer yayınlarda hesaplanan çevresel etki kategorileri ise çalışmanın amacına göre farklılık göstermektedir.

Tablo 2. APK malzemeler için yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları

APK Bileşimi	Fonksiyonel birim	Etki kategorileri	Amaç	Sonuç	Referans
Ahşap (yumuşak odunumsu)-HDPE	1 kg APK	AP, ATP element, FOOP, KIP, ÖP, OTİP	Alternatif malzeme kullanımı Kullanım ömrü sonu değerlendirilmesi	İkincil ahşap kullanımı en çevreci yaklaşımdır. Malzeme geri dönüşümü, yakıt olarak kullanılarak bertarafına göre daha çevre dostu bir yöntemdir.	[62]
Ladin ağacı-PP	100 kg APK	ATP fosil, AP, ATP element, KIP, ÖP	Alternatif malzeme kullanımı Kullanım ömrü sonu değerlendirilmesi	APK içeriğinde geri dönüştürülmüş PP ve mineral yün kullanılması daha az çevresel etki göstermektedir. Geri dönüştürülmüş PP'nin kullanım ömrü sonunda işlenmesi toplam emisyonları önemli ölçüde azaltmaktadır.	[63]
Ahşap tozu-HDPE	30 m ² APK	AP, ATP element, EE, FYK, KIP, ÖP, SK, SP	Ahşaba yapılan ön işlemin etkisinin belirlenmesi	Alkali bakır kuarterner ile ön işlem yapmanın ÖP dışındaki etki kategorilerinde daha iyi sonuç vermektedir	[57]
Çam ağacı talaşı-PLA	1 ton APK	AP, FOOP, KIP, ÖP, SP	APK içindeki katkıların (polihidroksialkanoatlar) incelenmesi Üretim süreçlerinin iyileştirilmesi	Katkısız APK için su tüketimi daha yüksektir. FOOP tüm kompozitler için en önemli etki kategorisidir. Ahşap kurutma işlemi optimizasyonu ve atık su ıslahı çalışmaları ile AKP üretim sürecinin çevresel etkiler azaltılabilir.	[64]
Odun atığı-Üre formaldehit reçine	1 ton ahşap	KIP	İnşaat odun atığının yönetim stratejilerinin (APK içinde, çimento katkısı, yakıt ve arazi dolgusu olarak kullanımının) karşılaştırılması	Atık ahşabın APK içinde kullanımının çevresel sürdürülebilirliğe katkısı bulunmaktadır. Atık ahşap için en iyi atık yönetiminin yakıt olarak kullanımı olduğu belirlenmiştir.	[59]
Odun lifi-PP	1 ton odun lifi	AP, FYK, ITP	APK'nın PP malzemeler ile karşılaştırılması	APK'nın, PP malzemelere göre daha çevre dostudur.	[61]
Ahşap (%50 yumuşak odunumsu + %50 sert odunumsu biyokütle)-polimer	1 ton ahşap, 1 kamyon ahşap	AP, FYK, KIP, ÖP, OTİP,	Toz ve pelet halinde kullanılan ahşabın etkisinin saptanması	APK üretimi için, pelet şeklinde ahşap kullanımının ekonomik ve çevresel faydaları bulunmaktadır.	[65]

Ladin talaşı-PP / Ladin talaşı polimer karışımı	1000 kg APK	FYK, KIP	İnşaat ve yıkım atıklarının APK'da kullanımının incelenmesi	Geleneksel atık bertarafı yöntemlerine göre inşaat atıklarının APK'da kullanımı avantajlı bir yöntemdir.	[60]
Çam iğnesi-PLA	1 kg PLA	AP, ATP element, ITP, KEP, KIP, ÖP, OTİP, TSEP	Kendiliğinden yetişebilen (çam iğnesi) veya yetişemeyen (kenevir) biyokütle çeşitlerinin karşılaştırılması	Kenevir lifi ile üretilen kompozitler daha üstün özelliklere sahip olmasına rağmen, çam iğnesi lifleri, düşük toksisite göstergelerine sahiptir.	[54]
Kenevir lifi-PLA			Biyokütle oranının etkisinin incelenmesi	PLA oranının azaltılması ile çevresel etkiler azalmaktadır.	
Keten lifi-PLA					
Kenevir lifi-PLA					
Pirinç kabuğu- PLA	1 kg APK	AP, KIP, ÖP, OTİP, SP	Organik ve inorganik (cam elyaf ve talk) dolgu malzemelerinin karşılaştırılması	Organik biyo-esaslı malzemelerin kullanımı daha düşük bir ekonomik/çevresel etki ve enerji yoğunluğu elde edilir.	[55]
Ahşap tozu-PLA			Hammadde tedariki, işlenmesi, nakliyesi ve kullanım ömrü sonu ile ilişkili maliyetleri, emisyonları ve enerji yoğunluğunun belirlenmesi		
Kurutulmuş damıtma-tane ve çözünürleri (DDSA)-PLA					
Çam talaşı-PLA	1 ton APK	AP, ATP element, FOOP, KIP, ÖP, SP	Stiren-bütadien-stiren (SBS) ile modifikasyonun ve SBS miktarının etkisinin belirlenmesi	SBS ile modifiye edilen APK'ler, SBS içermeyenlere göre daha çevre dostudur. APK içindeki biyokütle miktarı arttıkça çevresel etkiler azalmaktadır.	[66]
Ahşap tozu- HDPE	1000 kullanım	ATP fosil, AP, KIP, ÖP, OTİP	Ahşap, plastik ve APK'nin kıyaslanması	APK, KIP (biyojenik karbon hariç) hariç tüm kategorilerde en düşük çevresel etkiye sahiptir.	[58]
Ahşap-PE	1 m ² APK	AP, FOOP, KIP, ODF, ÖP	Malzeme bileşimi ve geometrisi farklı olan iki farklı APK'nın, iki farklı ahşap zemin kaplaması (çam ve bilinga) ile karşılaştırılması	Ham ahşaptan (çam) yapılmış malzeme, çevreye en zararsız olmasına rağmen, APK kullanım ömrü ve geri dönüşüm bakımından avantaj sunmaktadır.	[56]
Ahşap-PVC					

Abiyotik kaynakların tükenme potansiyeli (fosil olmayan) (ATP elements), Abiyotik kaynakların tükenme potansiyeli (fosil) (ATP fosil), Ekolojik etki (EE), Fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli (FOOP), Fosil yakıt (FYK), İnsan toksisite potansiyeli (İTP), Karasal ekotoksisite potansiyeli (KEP), Küresel ısınma potansiyeli (KIP), Ozon tabakasının incelenmesi potansiyeli, (OTİP), Ötrofikasyon potansiyeli (ÖP), Su kullanımı (SK), Sis potansiyeli (SP), Tatlı su canlılarına ekotoksisite potansiyeli (TSEP)

Tablo 2’de sunulan literatür bulguları incelendiğinde, genel olarak geri dönüştürülmüş malzemelerin ham madde olarak kullanılmasının yanı sıra, doğal malzemelerin de üretimde kullanılmasıyla elde edilen çeşitli alternatif kompozit malzemelerin farklı sektörlerde kullanımının çevresel etkilerinin değerlendirildiği görülmektedir. Ayrıca, hazırlanan çalışmaların bir kısmı, yaşam sonu basamağı için uygulanan farklı atık yönetimi alternatiflerinin çevresel etkilerini karşılaştırmaya odaklanmıştır. Çalışmaların amacına ve kapsamına uygun olarak farklı fonksiyonel birim ve çevresel etki kategorileri seçimi yapıldığı sonucuna varılmış; dolayısıyla, çalışmaların mukayese edilebilmesi açısından bir standardizasyon eksikliği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, yapılan literatür taramasında çok az sayıda çalışmada veriler için hassasiyet analizi yapılmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, kompozitlerin içeriğinde ahşap kullanılmasının çevresel etki kategorileri özelinde KIP değerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ancak, malzemelerin performansları, ekonomik ömrü, bakım ve onarım gibi faktörler göz önünde bulundurulmalı; ayrıca geleneksel malzemelerle, özellikle de kompozit yapısını oluşturan ahşap ve polimerik malzemelerle kıyaslanmasının gerekliliği de belirginleşmektedir. Göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus, yürütülen çalışmalarda çevresel sürdürülebilirlik için etki kategorileri incelenirken, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik analizlerinin değerlendirilmemiş olmasıdır. Bu nedenle, farklı hammadde kombinasyonlarını inceleyen çalışmaların yanı sıra, biyokütle ve polimer hammaddelerinin eldesinden APK kullanım ömrünün sonuna kadar atılmasına kadar tüm aşamalarının dikkate alındığı, beşikten mezara yaklaşımıyla çevresel, ekonomik ve sosyal bir analizin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, sürdürülebilirlik açısından büyük bir önem taşımaktadır.

V. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

APK malzemelerin çevre dostu ve eko-sürdürülebilir olmaları, onları modern hayatın pek çok uygulamasında tercih edilen malzemelerden biri haline getirmiştir. Son yıllarda, teknolojik gelişmeler doğrultusunda fonksiyonel ve uzun ömürlü malzemelere olan talebin artmasıyla birlikte, ahşap-plastik kompozitlerde malzeme seçimi, üretim tasarımı, maliyet azaltımı ve çevresel sürdürülebilirlik gibi konular önem kazanmıştır. Bu çalışmada, literatür taraması ile elde edilen veriler doğrultusunda, APK malzemelere yönelik farklı çevresel etki kategorileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. İncelenen literatür, belirli sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı amaçlayan çevresel etki çalışmalarının gün geçtikçe arttığını ancak halen yeterli seviyeye ulaşmadığını göstermektedir. Özellikle APK malzemelerin kullanım alanları ve küresel üretim hacmindeki beklenen artış göz önüne alındığında, yaşam döngüsü değerlendirme çalışmalarının bütünleşik bir yaklaşımla artırılması gerekliliği dikkat çekmektedir. Sonuç olarak, kaynak verimliliğini destekleyen, sorumlu üretim ve geri dönüşüm uygulamalarını teşvik eden yöntemler, APK malzemelerin dögüsel ekonomiye sağladığı katkıyı artırmaktadır. Bu malzemelerin dayanıklılığı, çok yönlülüğü ve yerel kaynak potansiyeli ile birleştiğinde, uzun ömür ve enerji verimliliği ilkeleri ile uyum içinde sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, APK malzemelerin üretim sürecine ikincil geri dönüştürülmüş ahşap ve polimer kaynaklarının dahil edilmesi, teknolojik inovasyonun ekolojik sorumlulukla uyumlu olduğu daha sürdürülebilir bir geleceğe katkı sunmaktadır. Ayrıca, APK malzemelerin yaşam döngüsü çevresel sürdürülebilirlik analizlerine ek olarak, ekonomik ve sosyal etkilerinin de değerlendirilmesinin, bu sektörün sürdürülebilirliğine önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı destekleyen Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü’ne 2022-01.BŞEÜ.03-07 numaralı BAP Projesi kapsamında verdikleri destek için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] United Nations. (1987). *The Brundtland Commission, Our Common Future, The Report of the World Commission on Environment and Development Oxford University Press, Oxford.*
- [2] Harris, J. M. (2003). Sustainability and sustainable development. *International Society for Ecological Economics, 1(1)*, 1-12.
- [3] [Azapagic, A. and Perdan, S. (2000). Indicators of Sustainable Development for Industry: A General Framework. *Process Safety and Environmental Protection, 78 (4)*, 243-261.
- [4] Tufan, M. Z. and Cengiz, Ö. (2012). Sürdürülebilirlik kavramı ve yapı malzemeleri için sürdürülebilirlik kriterleri. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 2(1)*, 6-13.

- [5] Ding, G. K. C. (2014). *3 - Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials: An overview*. Woodhead Publishing, 38-62.
- [6] Titirici, M., Baird, S. G., et al. (2022). The sustainable materials roadmap. *Journal of Physics: Materials*, 5(3), 032001.
- [7] Goldhahn, C., Cabane, E., et al. (2021). Sustainability in wood materials science: An opinion about current material development techniques and the end of lifetime perspectives. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 379, 20200339.
- [8] Özsin, G., Çolak, G., et al. (2024). Sürdürülebilir Ahşap Plastik Kompozit Malzemeler: Hammaddeler, Yapısal Özellikler, Üretim Süreçleri ve Güncel Eğilimler. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 264-280.
- [9] Woodard, A. C. and Milner, H. R. (2016). *7 - Sustainability of timber and wood in construction*. Woodhead Publishing, 129-157.
- [10] Andrady, A. L. and Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977-1984.
- [11] Biçergil, G. and Atılğan Türkmen, B. (2023). Evaluation of environmental impacts in PVC sector: the case of Turkey. *Plastics, Rubber and Composites*, 52(4), 238-247.
- [12] Örcü, E. and Atılğan Türkmen, B. (2022). Evaluating the sustainability of car mat manufacturing. *Sustainable Materials and Technologies*, 32, e00402.
- [13] Isola, C., Sieverding, H. L., et al. (2017). Life cycle assessment of photodegradable polymeric material derived from renewable bioresources. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2935-2944.
- [14] Alsabri, A. and Al-Ghamdi, S. G. (2020). Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance. *Energy Reports*, 6, 364-370.
- [15] Das, S., Liang, C., et al. (2021). *Life Cycle Assessment of Polymers and Their Recycling*. American Chemical Society, Vol. 1391, 143-170.
- [16] Boone, L., Pr eat, N., et al. (2023). Environmental performance of plastic food packaging: Life cycle assessment extended with costs on marine ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 894, 164781.
- [17] Kazemi Najafi, S. (2013). Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review. *Waste Management*, 33(9), 1898-1905.
- [18] Vidal, R., Mart inez, P., et al. (2009). Life cycle assessment of composite materials made of recycled thermoplastics combined with rice husks and cotton linters. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(1), 73-82.
- [19] Bergman, R., Oneil, E., et al. (2013). *Comparative life-cycle assessment of California redwood decking, Corrim*, 1-9.
- [20] Das, O., Babu, K., et al. (2022). Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112054.
- [21] Al Faruque, M. A., Salauddin, M., et al. (2022). Bast Fiber Reinforced Green Polymer Composites: A Review on Their Classification, Properties, and Applications. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 8006-8021.
- [22] Sun, W., Sun, Y., et al. (2023). Research on Biomass Waste Utilization Based on Pollution Reduction and Carbon Sequestration, 15(5), 4535.
- [23] Hill, C., Norton, A., et al. (2015). *12 - Environmental impacts of wood composites and legislative obligations*. Woodhead Publishing, 311-333.

- [24] Schwarzkopf, M. J. and Burnard, M. D. (2016). *Wood-Plastic Composites—Performance and Environmental Impacts*. Springer Singapore, 19–43.
- [25] Rabbat, C., Awad, S., et al. (2022). Sustainability of biomass-based insulation materials in buildings: Current status in France, end-of-life projections and energy recovery potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111962.
- [26] Pokhrel, G., Kizha, A. R., et al. (2021). Transportation Cost Analysis on Alternative Wood Feedstocks for Manufacturing Wood-Plastic Composites. *Bioresources*, 17, 634-651.
- [27] Braghiroli, F. L. and Passarini, L. (2020). Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities. *Current Forestry Reports*, 6(2), 172-183.
- [28] Xiao, R., Yu, Q., et al. (2023). Visual design of high-density polyethylene into wood plastic composite with multiple desirable features: A promising strategy for plastic waste valorization. *Journal of Building Engineering*, 63, 105445.
- [29] Huang, Y., Lu, L., et al. (2022). Eco-friendly wood-plastic composites from laminate sanding dust and waste poly(propylene) food pails. *Waste Management*, 149, 96-104.
- [30] Khalid, M. Y., Arif, Z. U., et al. (2022). Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 31, e00382.
- [31] Ge, S., Ouyang, H., et al. (2023). High-performance and environmentally friendly acrylonitrile butadiene styrene/wood composite for versatile applications in furniture and construction. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 6(1), 44.
- [32] Ramesh, M., Rajeshkumar, L., et al. (2022). A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects, 14(3), 589.
- [33] Nukala, S. G., Kong, I., et al. (2022). Preparation and Characterisation of Wood Polymer Composites Using Sustainable Raw Materials, 14(15), 3183.
- [34] Brusseau, M. L. (2019). *Chapter 32 - Sustainable Development and Other Solutions to Pollution and Global Change*. Academic Press, 585-603.
- [35] Finnveden, G. and Potting, J. (2014). *Life Cycle Assessment*. Academic Press, 74-77.
- [36] Jacquemin, L., Pontalier, P.-Y., et al. (2012). Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 1028-1041.
- [37] ISO. (2006). *Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.
- [38] ISO. (2006). *Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.
- [39] Baumann, H. and Tillman, A. M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application*. Studentlitteratur.
- [40] Demirer, G. N. (2011). *Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları - I, Yaşam Döngüsü Analizi, Pratik Yaşam Döngüsü Analizi Klavuzu AB Sürecinde İşletmeler ve Kamu için Yaşam Döngüsü Analizi Yöntem ve Örnekleri*.
- [41] Azapagic, A. (1999). Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, 73(1), 1-21.

- [42] Germirli Babuna, F., Baş, B. , Atılğan Türkmen, B. & Elginöz Kanat, N. (). (2023). Türk Endüstrisi için Temiz Üretim ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Örnekleri . Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik, 24(2) , 55-64.
- [43] Orucu, E. and Atılğan Turkmen, B. (2022). Evaluating the sustainability of car mat manufacturing. *Sustainable Materials and Technologies*, 32, e00402.
- [44] Rajendran, S. (2020). *Applications of Recycled Plastics and Life Cycle Assessment*. University of Sheffield, Sheffield.
- [45] Curran, M. A. (2013). Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2(3), 273-277.
- [46] Azapagic, A. (2004). *Life Cycle Thinking and Life Cycle Assessment (LCA)*. In *Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists*. John Wiley & Sons Ltd., 426-437.
- [47] Lee, K.-M. and Inaba, A. (2004). *Life Cycle Assessment, Best Practices of ISO 14040 Series, Committee on Trade and Investment, Asia-Pacific Economic Cooperation, Ministry of Commerce, Industry and Energy Republic of Korea*.
- [48] EU. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: First edition Luxembourg.
- [49] Baumann, H. and Tillman, A.-M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA : An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. Studentlitteratur AB, Lund, Sweden, 19-69.
- [50] Bruijn, H., Duin, R., et al. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [51] Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*. Springer Science & Business Media.
- [52] Rebitzer, G., Ekvall, T., et al. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701-720.
- [53] Azapagic, A. (2010). *Measuring Sustainable Development: An Overview*. In *Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists*. John Wiley & Sons Ltd., 26-55.
- [54] Operato, L., Vitiello, L., et al. (2023). Life cycle assessment of poly(lactic acid)-based green composites filled with pine needles or kenaf fibers. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135901.
- [55] Haylock, R. and Rosentrater, K. A. (2018). Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment and Techno-Economic Analysis of Polylactic Acid Composites with Traditional and Bio-Based Fillers. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(4), 1484-1503.
- [56] Feifel, S., Stübs, O., et al. (2015). Comparing wood–polymer composites with solid wood: the case of sustainability of terrace flooring. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(6), 829-836.
- [57] Bolin, C. A. and Smith, S. (2011). Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. *Journal of Cleaner Production*, 19(6), 620-629.
- [58] Khan, M. M. H., Deviatkin, I., et al. (2021). Environmental impacts of wooden, plastic, and wood-polymer composite pallet: a life cycle assessment approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(8), 1607-1622.
- [59] Hossain, M. U. and Poon, C. S. (2018). Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities. *Journal of Cleaner Production*, 177, 387-397.

- [60] Liikanen, M., Grönman, K., et al. (2019). Construction and demolition waste as a raw material for wood polymer composites – Assessment of environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 225, 716-727.
- [61] Xu, X., Jayaraman, K., et al. (2008). Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1), 168-177.
- [62] Sommerhuber, P. F., Wenker, J. L., et al. (2017). Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 235-248.
- [63] Väntsi, O. and Kärki, T. (2015). Environmental assessment of recycled mineral wool and polypropylene utilized in wood polymer composites. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 38-48.
- [64] Qiang, T., Yu, D., et al. (2014). Life cycle assessment on polylactide-based wood plastic composites toughened with polyhydroxyalkanoates. *Journal of Cleaner Production*, 66, 139-145.
- [65] Pokhrel, G., Gu, H., et al. (2021). Life Cycle Assessment (LCA) of Wood Flour and Pellets for Manufacturing Wood-Plastic Composites (WPCs). *Recent Progress in Materials*, 4(1), 1-1.
- [66] Qiang, T., Chou, Y., et al. (2019). Environmental Impacts of Styrene-Butadiene-Styrene Toughened Wood Fiber/Polylactide Composites: A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment, 16(18), 3402.