

Hızlı Moda, Yavaş Felaket: Karbon Ayak İzinin Anatomisi

Hülya Arabacı¹

Özet

Moda endüstrisi¹, 21. yüzyılda hızlı ve ultra-hızlı moda rejimlerinin etkisiyle estetik bir üretim alanı olmaktan çıkarak, küresel iklim krizini tetikleyen birincil karbon odaklarından biri haline gelmiştir. Çalışma, hazır giyim sektöründe karbon ayak izinin anatomisini, ham maddeden ürünün ömür sonu senaryolarına kadar uzanan beş temel yaşam döngüsü aşaması üzerinden incelemektedir. Çalışmada, geleneksel tasarım pratiklerinin çevresel kirlilikteki rolü sorgulanmakta ve bir giysinin yaşam döngüsü emisyonlarının yaklaşık %80'inin henüz tasarım masasındaki malzeme, tedarik ve üretim kararlarıyla kilitlendiği gerçeği ortaya konmaktadır. Metodolojik olarak, Yaşam Döngüsü Analizi araçları ile Ürün Çevresel Ayak İzi Kategori Kuralları incelenmiş; ikincil veri tabanlarının yün gibi doğal elyafları dezavantajlı, polyester gibi sentetik elyafları ise temiz gösterme eğiliminde olduğu yasal ve metodolojik kısıtlar üzerinden tartışılmıştır. Ayrıca, ileri ve geri dönüşüm yöntemlerinin (mekanik ve kimyasal) termodinamik sınırları, elyaf karışımlarının ayrıştırılmasındaki teknik engeller ve yapay zeka/makine öğrenmesi entegrasyonlu eko-tasarım yazılımlarının tasarımcıya sağladığı optimizasyon fırsatları analiz edilmiştir. Sonuç olarak çalışma, tasarımcı rolünün estetik bir form oluşturmaktan, dögüsel ekonomi prensiplerine dayalı, karbon odaklı bütünsel bir sistem mimarlığına evrilmesi gerektiğini savunmaktadır.

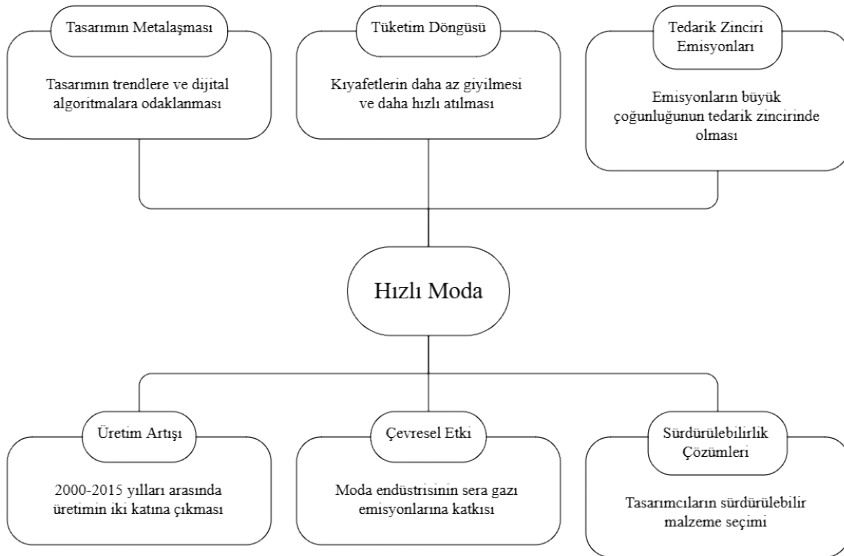
1. Giriş

Moda dünyası, 21. yüzyılın başından itibaren yaratıcılığın ve estetiğın ötesinde, etik ve çevresel bir sorumluluk snavıyla karşı karşıya kalmıştır. Tasarımcının rolü artık sadece form, renk ve doku seçimiyle sınırlı değildir; bugün her tasarım kararı, küresel bir karbon denkleminin parçasıdır. Geleneksel sezon döngülerinden “hızlı” ve “ultra-hızlı” moda rejimine geçiş, tasarımın

¹ arabacihulya@yandex.com, <https://orcid.org/0000-0003-2118-301>

doğasını dönüştürürken, çevresel etkileri de daha önce hiç olmadığı kadar görünür kılmıştır. Bu bölümde, moda tasarımcıları için karbon ayak izinin ne anlama geldiği ve bu verilerin estetik kararları nasıl şekillendirmesi gerektiği ele alınmaktadır.

Moda; değişim, yaratıcılık ve pazarlama olmak üzere üç temel üzerine kurulmuştur. Bu nedenle değişiklik, modanın doğasında var olan bir kavramdır. Bazı markaların sezon odaklı geleneksel değişiklik anlayışından sıyrılarak yeni mağazalar ve küçük koleksiyonlar ile sürekli olarak müşterilerine yeni ürünler sunmaları “Hızlı Moda” kavramını oluşturmuştur (Öztaş, 2021:469). Hızlı moda, tasarımın demokratikleşmesi gibi görünse de aslında yaratıcı sürecin hızla metalaştığı bir sistemi temsil etmektedir. Dzhengiz ve ark. (2023), tasarımcıların artık sadece trendlere değil, dijital algoritmalara ve “ultra-hız” mantığına yanıt veren bir rejimde çalıştığını savunmaktadır. 2000-2015 yılları arasında üretimin iki katına çıkması (Peters ve ark., 2021:295), tasarımın kalıcılıktan ziyade tüketilebilir bir an haline gelmesine neden olmuştur. Kişi başı tüketimin 13 kg’a çıktığı bu yeni düzende (Aponte ve ark., 2024), kıyafetlerin ortalama giyilme sayısındaki %36’lık düşüş, tasarımcının dayanıklılık ve estetik değer yaratma yeteneğinin sistem tarafından nasıl kısıtlandığını göstermektedir (Figür 1).



Figür 1. Hızlı moda ve sürdürülebilirlik sorunları (Peters ve ark., 2021; Aponte ve ark., 2024; Öztaş, 2021)

Moda tasarımı, bugün küresel sera gazı emisyonlarının %8 ila %10'unu şekillendiren bir karar mekanizmasıdır (Abbate ve ark., 2023:2). Tasarım masasında verilen bir kumaş veya boya kararı, havacılık ve deniz taşımacılığının toplamından daha fazla karbon salımına yol açan devasa bir endüstriyel çarkı harekete geçirmektedir (Mesjar ve ark., 2023:1). Sektörün 2030 yılına kadar emisyonlarını %50 artırma riskiyle karşı karşıya olması (Bailey ve ark., 2022:1), tasarımcıların estetik kaygılarını “dekarbonizasyon²” hedefleriyle birleştirmesini zorunlu kılmaktadır. Verimlilik artışlarına rağmen toplam emisyonların artması (Peters ve ark., 2021:1), sorunun sadece üretim tekniklerinde değil, tasarımın teşvik ettiği “aşırı tüketim” döngüsünde olduğunu kanıtlamaktadır.

Bir tasarımcı için karbon ayak izi, seçtiği elyafın tarladaki yolculuğundan (beşik), ürünün kullanıcının gardırobundaki ömrüne ve nihayetinde bir atığa dönüşmesine (mezar) kadar bıraktığı izdir. Markaların karbon ayak izinin %85-98'inin, yani neredeyse tamamının “Scope 3 Emisyonu³” adı verilen tedarik zinciri aşamalarında gerçekleşmesi, tasarımcının en büyük gücünün “tedarikçi ve malzeme seçimi” olduğunu gösterir. Emisyonların %75'inden fazlasının hammadde ve tekstil işleme safhalarında yoğunlaşması (Stridsland ve ark., 2023:1), sürdürülebilirliğin mağazadaki ambalajdan değil, tasarımcının malzeme kütüphanesinden başladığını teyit etmektedir.

Çalışmanın amacı, tasarımcılara yaratıcı süreçlerini birer “karbon yönetimi” aracına dönüştürebilecekleri bir perspektif sunmaktır. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) gibi teknik araçlar, tasarımcıların malzeme seçimindeki (örneğin pamuk vs. polyester) karbon yoğunluk noktalarını görmesini sağlayan bir yol haritası olarak ele alınacaktır. Her ne kadar veri kalitesi ve metodolojik sınır sorunları bu analizleri karmaşıklaştırsa da (He ve ark., 2025:1; Fonseca ve ark., 2023:2), tasarımcılar için bu veriler yeşil yıkama (greenwashing⁴) tuzağına düşmeden gerçek sürdürülebilir kararlar alabilmenin temel dayanağıdır. Çalışma, tasarımı sadece bir ürün yaratma süreci değil, endüstrinin karbon bütçesini iyileştiren yapısal bir müdahale biçimi olarak konumlandırmayı hedeflemektedir.

-
- 2 Dekarbonizasyon: Ekonomik faaliyetler, üretim süreçleri ve enerji tüketimi sonucunda atmosfere salınan karbondioksit ve diğer sera gazı emisyonlarının azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması sürecidir.
 - 3 Scope 3 Emisyonu: Bir şirketin doğrudan kontrol etmediği ancak değer zincirinde (tedarikçi faaliyetleri, hammadde temini, nakliye, ürün kullanımı ve atık yönetimi) meydana gelen dolaylı sera gazı salımlarıdır.
 - 4 Greenwashing: Şirketlerin çevre dostu olmadıkları halde, pazarlama ve reklam taktikleriyle kendilerini çevreci, sürdürülebilir veya doğa dostu gibi göstererek tüketicileri yanıltması ve kârlarını artırmayı hedefleyen aldatıcı bir uygulamadır.

2. Tasarımın Etki Haritası

Moda dünyasında sürdürülebilirlik, artık sadece bir niyet beyanı değil, veriye dayalı bir tasarım disiplindir. Bu bölümde, tasarımcıların yaratıcı süreçlerini içine hapseden hızlı moda sisteminin dinamikleri ve bu sistemden çıkış için bir navigasyon aracı olan Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) kavramları, tasarım odaklı bir perspektifle incelenmektedir.

Hızlı moda, tasarımın demokratikleşmesi maskesi altında, ürün ömrünü yapısal olarak kısaltan bir sistemdir. Literatürde “kısa yaşam döngülü ürünler” olarak tanımlanan bu model, haftalık hatta günlük koleksiyon döngüleriyle tanımlanmaktadır (George ve ark., 2023:29; Stefańska, 2021:200). Günümüzde ise bu model, yerini ultra-hızlı moda rejimine bırakmaktadır.

Ultra-hızlı moda, talep üzerine üretim ve dijital hız sayesinde tasarımın rafa iniş süresini birkaç güne indirmiştir (Dzhengiz ve ark., 2023; Camargo ve ark., 2020). Bu sistemin tasarımcı üzerindeki en yıkıcı etkisi tasarım temelli eskitme ve yalancı/sanki tek kullanımlık kavramlarında gizlidir. Ürünler, doğada yüzyıllarca parçalanmayan sentetik malzemelerden yapılmasına rağmen, öyle bir fiyat ve trend baskısıyla sunulur ki, kullanıcıda bir kez giyip atılabilir algısı yaratılır (George ve ark., 2023:29; Sahimaa ve ark., 2023:1115). Tasarımcı, bu rejimde bir estetik yaratıcısından ziyade, stillerin hızla moda dışı kalmasını sağlayan bir çarkın parçası haline getirilmektedir (Sahimaa ve ark., 2023:1118).

Tasarımcının bu karmaşık etki ağını yönetebilmesi için bir “X-Ray cihazına” ihtiyacı vardır. Bu cihaz Yaşam Döngüsü Analizi⁵’dir (LCA). ISO standartlarına dayanan LCA; bir ürünün hammadde eldesinden, üretim, lojistik, kullanım ve yaşam sonuna (beşikten mezara) kadar olan tüm girdi ve çıktılarını ölçen en güçlü nicel yöntemdir (Kaynak ve ark., 2025:1; Bodoga ve ark., 2024:1).

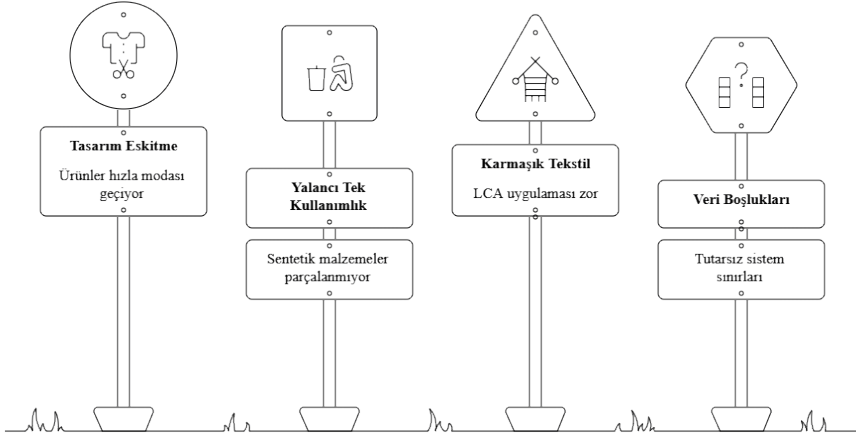
Tasarımcılar için LCA’nın önemi, sadece bir raporlama aracı olmasından değil, bir karar destek sistemi olmasından kaynaklanır. Özellikle Avrupa Birliği’nin “Ürün Çevresel Ayak İzi” (PEF) gibi yeni regülasyonları, LCA’yı moda tasarımının yasal ve teknik merkezine yerleştirmiştir (Sanyé-Mengual ve Sala, 2022:1221). LCA sayesinde tasarımcı, hangi malzemenin veya hangi üretim sürecinin (örneğin geleneksel veya dijital baskı) daha düşük karbon yoğunluğuna sahip olduğunu henüz tasarım aşamasındayken görebilmektedir (Bher ve Auras, 2024:1).

5 Yaşam Döngüsü Analizi (LCA): Bir ürün, hizmet veya sürecin hammadde eldesinden üretimine, dağıtımından kullanımına ve ömrünün sonundaki atık bertarafına kadar olan tüm süreç boyunca yarattığı çevresel etkileri sistematik olarak değerlendirilmesi.

Moda ürünlerinde LCA uygulaması, tekstilin karmaşık yapısı (karışık lifler, ıslak işlemler gibi) nedeniyle kendine özgü zorluklar barındırır. Literatürde, tasarımcıların odaklanması gereken iki temel alan belirlemiştir:

· Sıcak Noktaların Belirlenmesi (Hotspots): LCA verileri, emisyonların en yoğun olduğu aşamaları göstermektedir. Örneğin, pamuklu bir tişörtte tarım ve boyama aşamaları kritikken, sentetik bir üründe hammadde eldesi ve kullanım aşamasındaki mikroplastik salımı öne çıkmaktadır (Fonseca ve ark., 2023:1; González ve ark., 2023:3).

· Malzeme Seçimi: LCA, tasarımcıya “elyaf ikamesi” için veri sağlamaktadır. Geleneksel pamuk yerine geri dönüştürülmüş pamuk veya keten gibi düşük etkili liflerin seçilmesiyle, ürünün toplam ayak izinde %30’a varan azalmalar sağlanabileceği vaka çalışmalarıyla kanıtlanmıştır (Rossi ve ark., 2021:686;; González ve ark., 2023:4).



Figür 2. Moda sürdürülebilirliği zorlukları (Fonseca ve ark., 2023; González ve ark., 2023; Rossi ve ark., 2021)

Moda LCA'ları hâlâ veri boşlukları ve tutarsız sistem sınırları gibi metodolojik zorluklarla karşı karşıyadır (Dhiwar ve Bedarkar, 2025:1; He ve ark., 2025:1). Bu kısıtların aşılması için Blockchain, IoT ve yapay zeka destekli araçlar, tasarımcıların gerçek zamanlı ve daha şeffaf verilere ulaşmasını sağlayarak ekotasarımı sezgisel olmaktan çıkarıp kanıta dayalı bir sürece dönüştürmektedir (Popowicz ve ark., 2024:405; Younus, 2024:1).

3. Moda Ürünlerinde Karbon Ayak İzi: Yaşam Döngüsü Perspektifi

Son yıllarda insan kaynaklı emisyonların neden olduğu karbondioksit konsantrasyonlarındaki artış, küresel ısınma ve iklim değişikliğinde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, atmosferdeki sera gazı birikiminin iklim değişikliğine etkileri ve dünya üzerindeki olumsuz sonuçları ile ilgili çalışmalar her geçen gün artmaktadır (Coşkun ve Doğan, 2021:28).

Moda endüstrisinde tasarım, sadece bir estetik form oluşturma süreci değil, aynı zamanda ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca yayacağı karbon emisyonlarının %80'inden fazlasının kilitlendiği bir karar aşamasıdır. Tasarımcının malzeme seçimi, üretim tekniğini belirlemesi ve ürünün kullanım senaryosunu kurgulaması, karbon anatomisi denilen yapının temel taşlarını oluşturmaktadır. Bu bölümde, bir moda ürününün beş ana yaşam evresindeki karbon dinamikleri, 2021-2026 dönemindeki güncel akademik literatür ışığında derinlemesine analiz edilmiştir.

3.1. HamMadde : Elyafın Karbon Kimliği ve Tasarımcının İkilemi

Bir tasarımcının koleksiyon hazırlarken verdiği ilk ve en etkili karar elyaf seçimidir. Geleneksel yaklaşımlar, doğal elyafları her zaman çevreci olarak konumlandırırsa da, modern Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) çalışmaları bu durumun sanıldığından daha karmaşık olduğunu göstermektedir. Özellikle pamuk ve polyester arasındaki tarihsel rekabet, karbon emisyonları söz konusu olduğunda şaşırtıcı sonuçlar doğurmaktadır. Sri Lanka'daki kumaş üretim tesislerinden elde edilen veriler, geleneksel pamuklu kumaşların üretiminin kilogram başına yaklaşık 11,1 kg CO₂ emisyon yaydığını, buna karşın saf polyesterin 8,95 kg CO₂ ile daha düşük bir karbon yükü sunduğunu belgelemektedir. Bu durum, tasarımcıları doğal elyafın çevresel faydası ile sentetik elyafın karbon avantajı arasında stratejik bir ikileme sürüklemektedir. Ancak bu ikilemde asıl çıkış yolunu geri dönüştürülmüş malzemeler sunmaktadır. Geri dönüştürülmüş polyester (rPET) kullanımı, emisyonları 5,82 kg CO₂ seviyesine kadar çekerek saf polystere göre %35'lik bir tasarruf sağlamaktadır (Kumar ve ark., 2025:1). Benzer bir durum pamuk için de geçerlidir. Tasarımcıların tamamen saf pamuk kullanmak yerine, karışıma sadece %20 oranında geri dönüştürülmüş pamuk eklemeleri, ürünün karbon ayak izini senaryoya göre %50'ye varan oranlarda düşürebilmektedir (Kadem ve Ozan, 2024:821). Bu veriler, eko-tasarımda saf malzeme takıntısı yerine hibrit ve geri dönüştürülmüş içeriklerin karbon yönetimindeki hayati rolünü kanıtlamaktadır (Figür 3).



Figür 3. Elyaf seçiminde karbon ve toksisite dengesi (Kumara ve ark., 2025; Kadem ve Ozan, 2024)

Sürdürülebilirlik dünyasının yükselen yıldızı Lyocell (Tencel) gibi selülozik elyaflar için tablo biraz daha farklıdır. Çin merkezli karşılaştırmalı LCA çalışmaları, Lyocell üretiminin geleneksel viskona göre kimyasal toksisite ve asidifikasyon açısından çok daha temiz olduğunu, ancak yüksek elektrik ihtiyacı nedeniyle Küresel Isınma Potansiyeli⁶ değerinin viskonun yaklaşık iki katı olduğunu ortaya koymaktadır (Guo ve ark., 2021: 1545). Bu durum, tasarımcı için bir öncelik belirleme meselesidir: Karbon emisyonları mı minimize edilmek isteniyor, yoksa kimyasal kirlilik ve su ekotoksisitesi mi?

Tasarımcıların kullandığı LCA araçlarındaki veri güvenilirliği meselesi kritik bir eştir. 2025 yılına ait yeni analizler, sektörde yaygın kullanılan “Ecoinvent⁷” gibi veri tabanlarının eski (legacy) verilerinin yün gibi hayvansal elyafları olduğundan daha kirli, polyester ise daha temiz gösterme eğiliminde olduğunu saptamıştır (Nautiyal ve ark., 2025:1). Bu bulgu, tasarımcıların

6 Küresel Isınma Potansiyeli (GWP): Bir sera gazının, atmosfere salındığında belirli bir süre boyunca (genellikle 100 yıl) ne kadar ısıyı hapsedtiğini ve küresel ısınmaya ne kadar katkı sağladığını gösteren bir ölçü birimidir.

7 Ecoinvent: Ürünlerin, süreçlerin veya hizmetlerin çevresel etkilerini hesaplamak için kullanılan dünyaca ünlü bir LCA veritabanıdır.

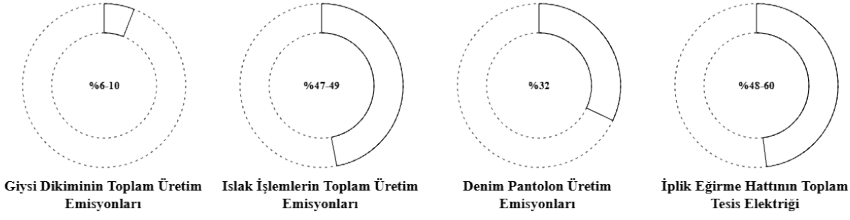
sadece “araçlardan çıkan sonuçlara” güvenmek yerine, bu verilerin arkasındaki metodolojik kabulleri de sorgulaması gerektiğini, aksi takdirde yanlış yönlendirilmiş bir malzeme seçimi yapabileceklerini göstermektedir.

3.2. Üretim: Enerji Yoğun Süreçler ve Sıcak Noktaların Anatomisi

Üretim aşaması, tasarımcının kâğıt üzerindeki estetik vizyonunun fiziksel bir nesneye dönüştüğü, ancak aynı zamanda en yoğun enerji ve kaynak tüketiminin gerçekleştiği aşamadır. Yaşam döngüsü perspektifinden bakıldığında, bir giysinin üretimindeki karbon yükü homojen bir şekilde dağılmamakta; aksine belirli “sıcak noktalarda” (hotspots) kümelenmektedir. 2021-2026 yılları arasındaki fabrika bazlı çalışmalar, tasarımcıların en çok odaklandığı aşama olan giysi dikiminin (konfeksiyon), aslında toplam üretim emisyonlarının sadece %6 ile %10 gibi oldukça düşük bir kısmını oluşturduğunu tutarlı bir şekilde göstermektedir (Khan ve ark., 2025:8529; Imran ve ark., 2023:1). Bu durum, karbon odaklı bir eko-tasarım stratejisinin terzilikten ziyade, daha gerideki endüstriyel süreçlere müdahale etmesi gerektiğini kanıtlamaktadır.

Üretim zincirindeki en büyük karbon faturası, tasarımcının renk, tuşe ve doku tercihlerini hayata geçiren ıslak işlemler (boyama ve terbiye) aşamasında kesilmektedir. Güncel araştırmalar, bu aşamanın üretim kaynaklı toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %47 ile %49’undan sorumlu olduğunu belgelemektedir (Khan ve ark., 2025:8529). Yüksek basınçlı buhar ve kesintisiz elektrik ihtiyacı gerektiren geleneksel boyama teknikleri, tekstil zincirinin en büyük karbon oburu olarak tanımlanmaktadır (Catarino ve ark., 2025:1). Özellikle moda dünyasının vazgeçilmezi olan denim segmentinde, tasarımın vazgeçilmezi olan yıkama ve eskitme efektleri, tek başına bir pantolonun üretim aşamasındaki emisyonlarının %32’sini oluşturabilmektedir (Imran ve ark., 2023:1). Tasarımcı için buradaki stratejik hamle, susuz boyama veya dijital baskı gibi alternatifleri seçerek bu devasa karbon yükünü doğrudan aşağı çekmektir.

Boyama süreçlerinin hemen ardından, iplik eğirme ve dokuma aşamaları ikinci büyük enerji tüketicileri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle iplik eğirme süreci, makinelerin mekanik gücü ve hassas tekstil liflerini korumak için gerekli olan devasa iklimlendirme sistemleri nedeniyle elektrik tüketiminin merkezidir. Kenya ve Pakistan’daki tekstil tesislerinde yapılan saha denetimleri, toplam tesis elektriğinin %48 ile %60 gibi baskın bir oranının sadece iplik eğirme hattında harcandığını ortaya koymaktadır (Kimutai & Kimutai, 2023:86; Imran ve ark., 2023:1). Bu veriler, tasarımcının iplik kalınlığı veya büküm tipi gibi görünüşte sadece teknik olan tercihlerinin, dolaylı olarak fabrikadaki enerji saatini hızlandırdığını ve dolayısıyla ürünün karbon anatomisini şekillendirdiğini göstermektedir (Figür 4).



Figür 4. Giysi üretiminde karbon yükü dağılımı (Kimutai & Kimutai, 2023; Inmran ve ark., 2023)

Tasarımcı perspektifinden üretim aşaması, sadece bir tedarik meselesi değil, teknik bir karardır. Emisyonların büyük çoğunluğunun buhar yoğun boyahanelerde ve enerji yoğun iplikhanelerde toplandığını bilmek, tasarımcıya koleksiyonun karbon bütçesini nerede koruması gerektiğine dair net bir yol haritası sunar. Giysi montajının düşük etkisi, tasarımcıların yerel üretim gibi lojistik avantajlara odaklanmasını sağlarken, asıl emisyon kaynağı olan hammadde işleme süreçlerindeki enerji karmasını ve teknolojik verimliliği göz ardı etmemesi gerektiğini hatırlatmaktadır.

3.3. Dağıtım: Küresel Tedarik Zinciri ve Hızın Karbon Bedeli

Moda lojistiği, bir giysinin toplam yaşam döngüsü emisyonları içerisinde genellikle üretim veya kullanım aşamalarına kıyasla daha düşük bir paya sahip gibi görünse de, bu durum tasarımcının ve marka yönetiminin zaman konusundaki stratejik kararlarıyla radikal biçimde değişebilmektedir. Lojistiğin karbon ayak izi üzerindeki belirleyici unsur, kat edilen mesafeden çok, tercih edilen taşıma modunun enerji yoğunluğudur. 2021-2026 dönemini kapsayan araştırmalar, özellikle hızlı moda döngülerinde lojistiğin ikincil bir etkiden çıkarak bir “karbon patlamasına” dönüşebileceğini vurgulamaktadır (Matuszak-Flejszman ve ark., 2024:1).

Tasarımcıların ve planlama ekiplerinin önündeki en kritik seçim, deniz yolu ile hava yolu taşımacılığı arasındaki dengeyi kurmaktır. Avustralya merkezli tekstil tedarik zinciri analizleri, lojistik operasyonlarında deniz yolu yerine hava yoluna kaymanın, taşımacılık kaynaklı karbon ayak izini tek başına %30 oranında artırabildiğini göstermektedir (Moazzem ve ark., 2018:1574). Hava yolu taşımacılığı, ton-kilometre başına en yüksek emisyon yoğunluğuna sahip taşıma modudur. Ancak günümüzün ultra-hızlı moda modellerinde, bir tasarımın podyumdan rafa veya dijitalden tüketiciye ulaşma süresini kısaltma baskısı, markaları binlerce kilometrelik mesafeleri havadan kat etmeye zorlamaktadır (Senese ve ark., 2025:1).

Karbon odaklı bir eko-tasarım perspektifi için lojistik, sadece ürünün sevkiyatı değil, aynı zamanda hammaddenin fabrikaya, yarı mamulün boyahaneye gitmesi gibi çok katmanlı (multi-tier) hareketleri de kapsamaktadır. Her ne kadar deniz yolu en düşük karbonlu uzun mesafe seçeneği olsa da, fabrikadan limana veya limandan depoya yapılan karayolu taşımacılığı (road freight) da ara emisyon noktalarını oluşturmaktadır. Bir tasarımcının yakın tedarik kararı, sadece mesafeyi kısaltmakla kalmaz; aynı zamanda markanın teslimat süresini deniz veya demir yolu gibi daha yavaş ama karbon-verimli modlarla yönetmesine olanak tanıyarak lojistiğin toplam ürün ayak izindeki payını minimize etmesine yardımcı olmaktadır (Moazzem ve ark., 2018:1574; Matuszak-Flejszman ve ark., 2024:!).

3.4. Kullanım: Tasarımcının Elinden Çıktıktan Sonrası ve Tüketici Denklemi

Tasarımcının bir ürün üzerindeki doğrudan kontrolü, ürün paketlenip depodan çıktığı anda sona eriyor gibi görünse de, Yaşam Döngüsü Analizi verileri bunun tam aksini söylemektedir. Tasarım aşamasında verilen kararlar (kumaşın dayanıklılığı, seçilen renklerin haslık derecesi ve bakım talimatları), ürünün kullanım evresindeki karbon ayak izini doğrudan belirleyen görünmez bir el gibidir. 2021-2026 dönemini kapsayan araştırmalar, tüketici kullanım alışkanlıklarının, giysinin ne sıklıkla yıkandığı, nasıl kurutulduğu ve en önemlisi ne kadar süreyle gardıropta tutulduğu, ürünün kullanım başına düşen karbon faturasını onlarca kat değiştirebildiğini ortaya koymaktadır.

Kullanım aşamasındaki karbon emisyonlarının en büyük itici gücü, yıkama makinelerindeki suyun ısıtılması için harcanan enerjidir. Sık yıkanan giysilerde, sadece kullanım evresindeki enerji tüketimi, ürünün tüm yaşam döngüsü enerjisinin %50 ila %80'ini oluşturabilmektedir (Wiedemann ve ark., 2021:1; Xia ve ark., 2025:1). Tasarımcının bakım etiketi üzerindeki yönlendirmesi burada hayati bir rol oynamaktadır. Örneğin, pamuklu bir tişörtün 60°C yerine 30°C'de yıkanması, enerji talebini yaklaşık %4 oranında düşürürken, makinenin tam kapasite doldurulması, yarım yükte çalıştırmaya kıyasla kullanım başına karbon emisyonunu %7 oranında azaltmaktadır (Sohn ve ark., 2021:2153; Xia ve ark., 2025:1). Ancak asıl dramatik fark kurutma alışkanlıklarında görülmektedir; mekanik kurutma (tumble drying) yerine asarak kurutma yöntemi, bir giysinin toplam karbon ayak izini %8 oranında hafifletebilmektedir (Sohn ve ark., 2021:2153) (Figür 5).



Figür 5. Giysi yaşam döngüsü analizi ve karbon ayak izi (Wiedemann ve ark., 2021; Xia ve ark., 2025; Sohn ve ark., 2021)

Tasarımcı perspektifi için kullanım aşamasındaki en sarsıcı parametre “giysi ömrü” kavramıdır. LCA çalışmaları, karbon azaltımındaki en güçlü kaldıraçın üretim verimliliği değil, giysinin giyilme sayısını artırmak olduğunu kanıtlamaktadır. Bir merinos yünü kazağın toplam giyilme sayısını 109’dan 400’e çıkarmak, giyim başına düşen sera gazı salımını %60 ila %68 oranında düşürmektedir (Wiedemann ve ark., 2021). Buna karşılık, bir kez giyilip atılan bir ürünün emisyon yükü, normal bir senaryoya göre 100 kattan daha fazladır. Tasarımcının malzemeyi seçerken sunduğu dayanıklılık ve zamansız estetik, tüketicinin ürünü elinde tutma süresini artırarak ürünün karbon anatomisini radikal bir şekilde iyileştirmektedir (Zuin ve ark., 2025; Hammar ve ark., 2024:1880).

Kullanım aşaması, tasarımcıya şu gerçeği hatırlatmaktadır: Eko-tasarım, sadece düşük karbonlu elyaf seçmek değil; aynı zamanda tüketicinin ürünü daha az yıkamasını, düşük sıcaklıkta temizlemesini ve yıllarca giymesini sağlayacak teknik ve görsel kaliteyi inşa etmektir. Şanghay gibi karbon

yoğun enerji kaynaklarına sahip bölgelerde yapılan saha araştırmaları, gerçek tüketici davranışlarının karbon ayak izini etiket değerlerinden 5 kat daha fazla etkileyebildiğini göstermektedir (Yuan ve ark., 2022:1938). Bu durum, tasarımcının bakım talimatlarını bir yan detay değil, ürünün çevresel performansını belirleyen ana tasarım bileşeni olarak görmesi gerektiğini belgelemektedir.

3.5. Yaşam Sonu: Atık Yönetiminden Döngüsel Kaynak Yönetimine

Tasarım sürecinin son halkası olan yaşam sonu, bir giysinin karbon anatomisinde ya bir son ya da yeni bir döngünün başlangıcıdır. Tasarımcının henüz ilk aşamada yaptığı malzeme kompozisyonu seçimleri (örneğin tek tip elyaf kullanımı veya karmaşık elyaf karışımları) ürünün atık aşamasındaki karbon faturasını doğrudan mühürlemektedir. 2021-2026 yılları arasındaki Yaşam Döngüsü Analizi çalışmaları, tekstil atıklarının yönetim biçiminin, ürünün toplam iklim performansını belirleyen en kritik karar eşiklerinden biri olduğunu tutarlı bir şekilde göstermektedir.

Akademik literatürdeki en net ortak ifade, tekstil atıklarının depolanması ve yakılmasının iklim değişikliği üzerindeki yıkıcı etkisidir. Tekstil ürünleri, yakıldığında kilogram başına 2 kg CO₂ üzerinde emisyon yayarak, belediye atıkları içerisinde plastiklerden sonra iklim için en kötü ikinci fraksiyon olarak tanımlanmaktadır (Abagnato ve ark., 2024:74). Avustralya ve Avrupa merkezli senaryo analizleri, tekstil atıklarını yakma veya depolama yerine geri dönüşüme yönlendirmenin, saf malzeme ihtiyacını ortadan kaldırması sayesinde ton başına yaklaşık 1,7 ton CO₂ tasarrufu sağlayabildiğini belgelemektedir (Abagnato ve ark., 2024:74; Khan ve ark., 2025:8529). Bu noktada tasarımcının rolü, ürünü “geri dönüştürülebilir” kurgulayarak bu devasa emisyon tasarrufunun kapısını açmaktır.

Geri dönüşüm teknikleri arasındaki karbon hiyerarşisi ise tasarımcılar için ayrı bir teknik analiz gerektirmektedir. Mekanik geri dönüşüm, en düşük enerji ve karbon yoğunluğuna sahip seçenek olarak öne çıkmakta ve doğrudan Küresel Isınma Potansiyeli açısından en avantajlı pozisyonda yer almaktadır (Khan ve ark., 2025:8529). Ancak kimyasal geri dönüşüm, daha yüksek enerji gerektirmesine rağmen, özellikle tasarımcının estetik kaygılarla seçtiği karışık elyafları veya yüksek kaliteli selülozik iplikleri tekrar döngüye sokabilmesi sayesinde, uzun vadede saf elyaf üretiminden kaçınma noktasında %92 olasılıkla iklim faydası sağlamaktadır (Sandin ve ark., 2025:1). Bu durum, tasarımcıya malzemenin sadece nereden geldiğini değil, nereye gidebileceğini de hesaba katan bir vizyon yüklemektedir.

Yaşam sonu aşaması, tasarımın sorumluluk sınırlarını belirlemektedir. Bir giysinin çöpe gitmesi yerine mekanik veya kimyasal yollarla geri kazanılması, tasarımın döngüsellığı destekleyen teknik detaylarına (sökülebilir aksesuarlar, dikiş ipliğı uyumu vb.) bağlıdır. Şili'den İsveç'e kadar uzanan vaka çalışmaları, geri dönüşümün doğrudan emisyonları, depolamaya göre yüksek görünse de, saf üretimi desteklemesi sayesinde toplam sistemde net bir emisyon azalması yarattığını kanıtlamaktadır (Espinoza-Pérez ve ark., 2022:1; Zamani ve ark., 2015:676). Bu veriler ışığında, tasarımcının “yaşam sonu” stratejisi, ürünün karbon anatomisinin finalini belirleyen en güçlü eko-tasarım kaldıracıdır.

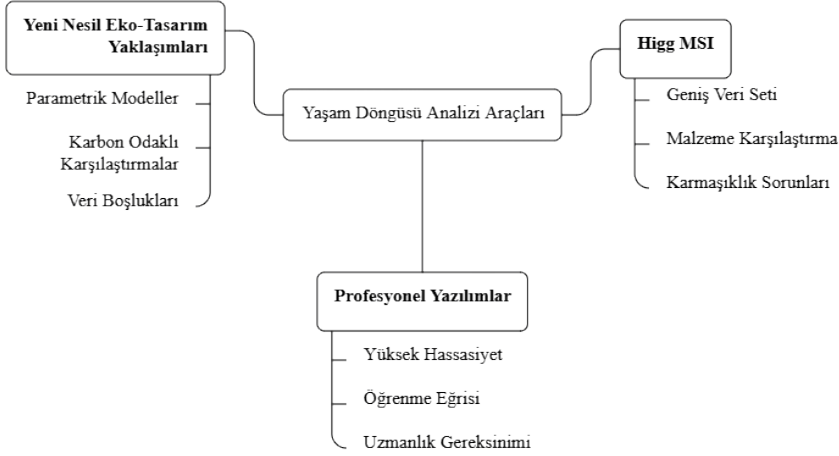
4. Eko-Tasarım Araçları, Veri Tabanları ve Yazılımlar

Tasarım aşamasında karbon ayak izini yönetmek, sadece niyet değil, aynı zamanda doğru veriye doğru zamanda ulaşma meselesidir. Üçüncü bölümde incelenen “karbon anatomisi”, ancak tasarımcıların elindeki dijital araçlar ve veri tabanları aracılığıyla ölçülebilir ve iyileştirilebilir hale gelmektedir. Ancak güncel araştırmalar, bugün piyasada bulunan araçların bilimsel titizliğı ile tasarım sürecinin hızı arasında ciddi bir gerilim olduğunu ortaya koymaktadır.

4.1. Moda Tasarımı İçin LCA Araçları: Karmaşıklık ve Erişilebilirlik Dengesi

Moda endüstrisi için geliştirilen Yaşam Döngüsü Analizi araçları, tasarımcıların malzeme seçiminden son ürün aşamasına kadar karbon yükünü izlemelerine yardımcı olmayı hedeflemektedir. Bu alanda en yaygın kullanılan araç olan Higg MSI⁸ (Material Sustainability Index), yaklaşık 80 temel malzeme ve 400'den fazla üretim sürecini kapsayan geniş bir veri seti sunarak, tasarımcılara henüz başlangıç aşamasında malzeme karşılaştırma imkânı tanımaktadır (Goncalves & Silva, 2021:1). Ancak Higg endeksinin tasarım süreçlerine entegrasyonu sanıldığı kadar sorunsuz değildir. 2024 yılında yapılan bir çalışma, moda profesyonellerinin Higg MSI'ı anlamlandırmada ve doğru kararlar üretmede zorluk yaşadığını, bu karmaşıklığın aracın karar verici etkisini sınırladığını saptamıştır (Palomo-Lovinski, 2024:373). Ayrıca, Higg MSI'nın sunduğu tekil puanlama sisteminin bazen yanıltıcı olabileceğı ve çok boyutlu çevresel etkileri tam yansıtamayabileceğı konusunda metodolojik eleştiriler bulunmaktadır (Prado ve ark., 2021:1357) (Figür 6).

8 Higg MSI: Tekstil ve hazır giyim ürünlerinde kullanılan hammaddelerin çevresel etkisini ölçen ve karşılaştıran bir değerlendirme aracıdır.



Figür 6. Moda endüstrisinde yaşam döngüsü analizi araçları (Goncalves & Silva, 2021; Prado ve ark., 2021; Palomo-Lovinski, 2024)

Endüstri standardı olarak kabul edilen GaBi ve SimaPro gibi profesyonel yazılımlar ise çok daha yüksek bir bilimsel hassasiyet sunmalarına rağmen, tasarımcılar için ciddi bir bariyer oluşturmaktadır. Yapılan kullanıcı deneyimi araştırmaları, bu yazılımların öğrenme eğrisinin tasarımcılar için çok dik olduğunu; bir tasarımcının bu araçları iş akışına dahil edebilmek için bazen bir haftadan fazla yoğun bir eğitim alması gerektiğini göstermektedir (Chatty ve ark., 2021). Tasarımın en kritik kararlarının verildiği ilk aşamalarda, bu kadar ağır ve uzmanlık gerektiren araçları kullanmak, tasarım sürecini yavaşlatma riski taşımaktadır. Bu nedenle araştırma dünyası, tasarımcılar için uzman yazılımlarından ziyade, hızlı sonuç veren Tarama LCA veya parametrik modellerin daha etkili bir çözüm olduğunu vurgulamaktadır (Kumar ve ark., 2025). Bu gerilimi aşmak için yeni nesil eko-tasarım yaklaşımları, tasarım parametrelerini (malzeme türü, ağırlık, üretim lokasyonu vb.) doğrudan emisyon değerlerine bağlayan daha hızlı ve basitleştirilmiş modeller önermektedir. Bu yöntemler, tasarımcının derin bir LCA uzmanı olmasına gerek kalmadan farklı konseptler arasında karbon odaklı karşılaştırmalar yapmasına olanak tanır (Kamalakkannan & Kulatunga, 2021:1297; Hassan ve ark., 2022:1).

Tasarımcılar için en etkili yol haritası; tasarımın ilk aşamalarında hızlı malzeme taraması yapan basitleştirilmiş araçları (Higg MSI gibi) kullanmak, tasarım olgunlaştığında ise profesyonel uzmanlar tarafından yönetilen GaBi veya SimaPro gibi araçlarla nihai doğrulamayı gerçekleştirmektir. Ancak moda sektöründeki veri boşlukları ve metodolojik tutarsızlıklar, bu araçların her

birinin sonuçlarını dikkatle değerlendirmeyi zorunlu kılmaktadır (Dhiwar & Bedarkar, 2025:1).

4.2. İkincil Veri Tabanları ve Şeffaflık: Veri Boşluklarının Tasarım Kararlarına Etkisi

Eko-tasarım araçlarının kalbi, arka planda çalışan ikincil yaşam döngüsü envanter (LCI) veri tabanlarıdır. Moda dünyasında karbon ayak izi hesaplamaları; büyük oranda ecoinvent, Exiobase veya markaların kendi kapalı devre indeksleri (Higg MSI gibi) üzerinden yürütülmektedir. Ancak güncel araştırmalar, bu veri tabanlarının vazgeçilmez olmalarına rağmen, veri boşlukları ve metodolojik farklılıklar nedeniyle tasarım kararlarını ciddi şekilde saptırabildiğini göstermektedir.

Veri tabanları arasındaki en büyük sorun, aynı ürün için sunulan karbon ayak izi değerlerinin bazen iki kattan fazla farklılık gösterebilmesidir (Steubing ve ark., 2022:1406). Bu durum, bir tasarımcının seçtiği malzemenin çevreci olup olmadığının, bilimsel gerçeklikten ziyade kullanılan veri tabanına bağlı kalmasına neden olmaktadır. Özellikle “miras veri” olarak adlandırılan eski tarihli envanterler, tasarımcıların malzeme algısını uzun süre hatalı yönlendirmiştir. Örneğin, 2025 tarihli bir analiz, yaygın veri tabanlarının polyesterin karbon emisyonunu %44 oranında olduğundan düşük gösterirken, yün gibi doğal elyafların etkisini olduğundan fazla tahmin ettiğini ortaya koymuştur (Nautiyal ve ark., 2025:1). Bu tür sistematik hatalar, tasarımcıları sadece karbon verisine bakarak sürdürülebilir olmayan sentetik elyaflara yönlendirmekte ve hatalı eko-etiketleme süreçlerine yol açmaktadır.

Moda tedarik zincirinin karmaşıklığı, tasarımcıların birincil verilere ulaşmasını zorlaştırmaktadır. Çoğu marka, ham lif kaynağını (örneğin yünün hangi çiftlikten geldiğini) tam olarak izleyemediği için ecoinvent gibi jenerik veri tabanlarının ortalama değerlerine güvenmek zorunda kalmaktadır (Bianco ve ark., 2023:1). Ancak bu jenerik veriler; coğrafi farklılıkları, enerji karmalarını ve üretim verimliliklerini yansıtmada yetersiz kalmaktadır. Veri setlerindeki bu çözümlülük eksikliği, tasarımcıların “sıcak noktaları” (hotspots) yanlış tanımlamasına ve karbon azaltım stratejilerini yanlış süreçlere odaklamasına neden olmaktadır (Fonseca ve ark., 2023).

Veri tabanlarındaki belirsizlikler, tasarımcılar için iki kritik risk doğurmaktadır:

- Hatalı Malzeme Sıralaması:** Geri dönüştürülmüş, organik veya konvansiyonel seçenekler arasındaki karbon farkı, veri tabanı hatası içinde kaybolabilir (Gonçalves ve ark., 2024:1).

Net-Zero Planlamasında Sapma: Kurumsal sürdürülebilirlik hedefleri, tutarsız ikincil verilere dayandığında, tasarım kararlarının gerçek çevresel etkisi ölçülemez hale gelebilir (Stridsland ve ark., 2023:1).

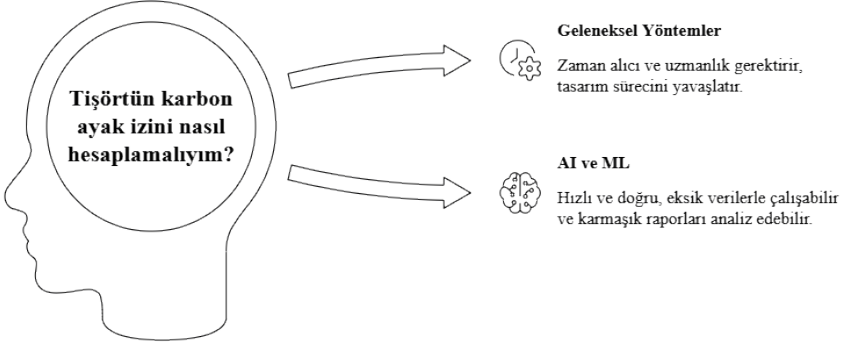
Veri tabanlarındaki belirsizliklerin farkında olan bir tasarımcı, sadece tek bir “karbon puanına” güvenmek yerine, verinin kaynağını sorgulayan ve sektöre özel, şeffaf, harmonize edilmiş veri yapılarını (PEFCR⁹ gibi) talep eden bir tutum sergilemelidir. Tasarımın şeffaflık ayağı, ancak güncel ve doğrulanabilir envanterlerin kullanımıyla sağlam bir temele oturabilir (Mutambo ve ark., 2024:1).

4.3. Tasarımın Yeni İş Ortağı: Yapay Zeka (AI) Destekli Karbon Tahmini

Geleneksel yöntemlerle bir tişörtün karbon ayak izini hesaplamak; aylar süren veri toplama, karmaşık yazılımlar ve uzmanlık gerektiren bir süreçtir. Tasarımcılar için bu durum, koleksiyon hazırlama hızıyla asla örtüşmez. Ancak 2021-2026 arası araştırmalar, Yapay Zeka (AI) ve Makine Öğrenmesi (ML) modellerinin bu hız bariyerini yıktığını göstermektedir. AI artık sadece görsel üretmek için değil, tasarımın çevresel etkisini saniyeler içinde ölçmek için de kullanılmaktadır.

Tasarımcılar için en büyük devrim, AI'nın eksik verilerle çalışabilme becerisidir. Henüz numune bile dikilmeden, sadece kumaş türü, hedeflenen gramaj ve üretim bölgesi gibi temel bilgiler sisteme girildiğinde; AI; geçmişteki binlerce Yaşam Döngüsü Analizi verisinden öğrenerek bir tahmin yürütmektedir. Bu modeller, giysi sürdürülebilirliğini %91 gibi yüksek bir doğrulukla sınıflandırabilmektedir (Satinet & Fouss, 2022:1). Yani tasarımcı, çizim aşamasındayken “Eğer bu ceket polyester yerine geri dönüştürülmüş naylon kullanılarak yapılırsa ne olur?” sorusunun yanıtını saniyeler içinde alabilmektedir (Popowicz ve ark., 2024:405).

9 PEFCR: Ürün Çevresel Ayak İzi Kategorisi Kuralları (Product Environmental Footprint Category Rules) anlamına gelen, Avrupa Birliği tarafından geliştirilmiş standartlaştırılmış bir çevresel etki hesaplama metodolojisidir.



Figür 7. Karbon ayak izi tahmini (Satinet & Fouss, 2022; Popowicz ve ark., 2024)

LCA raporları genellikle tasarımcıların anlamlandırmakta zorlandığı binlerce teknik veri ve kimyasal terimle doludur. Yeni nesil AI Ajanları, bir tasarım asistanı gibi çalışarak bu karmaşık raporları analiz etmekte ve tasarımcıya uygulanabilir öneriler sunmaktadır : “Bu modelin karbon yükü boyama aşamasında yoğunlaşıyor; su tasarruflu bir boyama tekniği seçilirse ayak izi %20 düşürülebilir”. AI, teknik mühendislik verilerini tasarım diline çeviren bir köprü vazifesi görerek eko-tasarımı daha erişilebilir kılmaktadır (Goridkov ve ark., 2025:1).

Yeni nesil AI algoritmaları, tasarımı sadece fabrikadan çıkana kadar değil, kullanıcının elindeyken de takip edebilmektedir. Kumaşın kaç yıkamadan sonra formunu kaybedeceği veya karbon yükünün kullanım aşamasında nasıl artacağı, gerçek zamanlı verilerle simüle edilebilir. Bu öngörü, tasarımcıların uzun ömürlü ve kolay tamir edilebilir ürünler geliştirmesini, yani kâğıt üzerindeki çevreciliğin ötesine geçerek gerçek dünyada da düşük karbonlu giysiler üretmesini sağlamaktadır.

AI'nın hızı ve pratikliği, %5 ile %20 arasında değişen küçük bir tahmin hatasını beraberinde getirmektedir. Ancak tasarımın ilk aşamalarında (konsept süreci) mükemmel sonuçtan ziyade, doğru yönü bulmak kritik olduğu için bu hata payı kabul edilebilir düzeydedir. AI, tasarımcıyı teknik hesaplamaların boğuculuğundan kurtarıp, ona yaratıcılığını çevresel verilerle harmanlama özgürlüğü tanımaktadır.

4.4. Blockchain ve Dijital Ürün Pasaportları

Tasarım aşamasında verilen kararların ve kullanılan düşük karbonlu malzemelerin nihai tüketiciye kanıtlanması, eko-tasarımın en büyük zorluklarından biridir. Blockchain teknolojisi ve buna bağlı olarak gelişen Dijital Ürün Pasaportları, bir giysinin hammaddesinden geri dönüşüm aşamasına

kadar olan tüm yolculuğunu değiştiremez bir şekilde kayıt altına alarak bu güven sorununu çözmektedir. Özellikle 2021-2026 dönemini kapsayan çalışmalar, bu teknolojilerin sadece birer takip aracı değil, tasarımcının çevresel iddialarını doğrulayan dijital birer mühür olduğunu vurgulamaktadır.

Avrupa Birliği'nin Eko-tasarım Regülasyonu (ESPR) ile zorunlu hale gelmeye başlayan Dijital Ürün Pasaportu, her ürün için benzersiz bir dijital kimlik oluşturmaktadır. Tasarımcı için bu, ürünün içine yerleştirilen bir QR kod veya NFC etiketi aracılığıyla; malzemenin menşei, karbon ayak izi verileri ve bakım talimatlarının doğrudan kullanıcıya sunulması demektir. Araştırmalar, bu dijital pasaportların tasarımın sadece estetik bir nesne değil, aynı zamanda yaşayan ve şeffaf bir veri seti olarak görülmesini sağladığını belirtmektedir (Goncalves & Silva, 2021:1).

Tasarımcıların sıklıkla karşılaştığı “gerçekten organik mi?” veya “gerçekten geri dönüştürülmüş mü?” gibi sorular, Blockchain tabanlı izlenebilirlik sistemleri ile yanıt bulmaktadır. Tedarik zincirindeki her aktörün (lif üreticisi, dokumacı, boyahane) kendi karbon verisini sisteme işlemesiyle oluşan bu şeffaf veri akışı, tasarımcının kâğıt üzerindeki sertifikaların ötesine geçerek, doğrulanmış verilerle eko-tasarım yapma gücünü artırmaktadır (Mutambo ve ark., 2024). Bu sistem, markanın sürdürülebilirlik iddialarını somutlaştırarak tasarımın değerini yükseltmektedir.

Blockchain ve DPP'nin en büyük etkisi, ürünün kullanım sonrası aşamasında görülmektedir. Bir giysi ömrünü tamamlayıp geri dönüşüm tesisine gittiğinde; dijital pasaportundaki veriler sayesinde hangi eyaflardan oluştuğu ve nasıl ayrıştırılması gerektiği anında anlaşılmaktadır. Tasarımcı, daha ürünün ilk çizgisini çekerken bu dijital pasaportun içine geri dönüşüm yönergelerini kodlayarak döngüsel ekonominin mimarı haline gemektedir (Stridsland ve ark., 2023:1). Özellikle karmaşık ürün yapılarında (örneğin profesyonel iş kıyafetleri veya ayakkabılar), bu veri paylaşımı karbon ayak izini minimize eden geri kazanım süreçlerini doğrudan desteklemektedir (Bodoga ve ark., 2024:1).

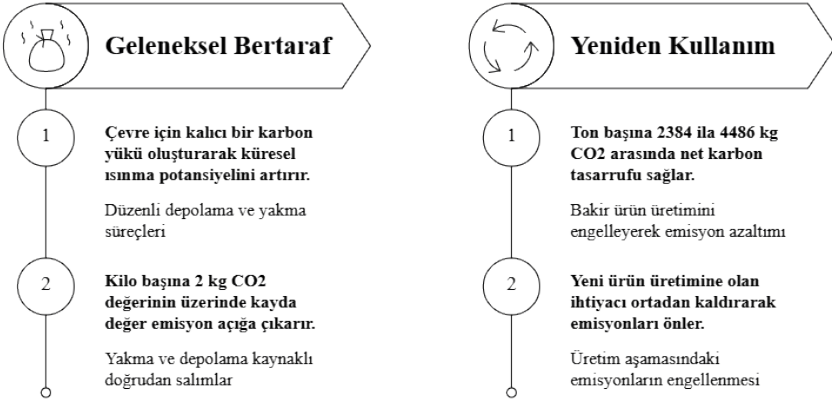
Dijital pasaportlar, tasarımcıyı tüketicisiyle doğrudan bir bağ kurmaya itmektedir. Tasarımcı artık sadece bir ürün tasarlamakla kalmaz; o ürünün karbon yolculuğunu şeffaf bir şekilde anlatan bir veri küratörü rolünü üstlenir. Bu şeffaflık altyapısı, tasarımın başarısını sadece görsellikle değil, sunulan verinin doğruluğu ve erişilebilirliği ile de ölçülebilir kılmaktadır (Bianco ve ark., 2023:1).

5. Tekstil Atık Yönetimi ve Yaşam Sonu Stratejilerinin Karbon Dengesi

Moda tasarımcıları için tasarım süreci genellikle bir giysinin askıya çıktığı veya satıldığı an bitmektedir, ancak ürün yaşam döngüsü analizi (LCA) perspektifi, gerçek karbon sorumluluğunun giysinin yaşam sonu aşamasında da devam ettiğini göstermektedir. Bir tasarımcının malzeme seçimi, dikiş ipliği tercihi ve giysi konstrüksiyonu, o ürünün atık haline geldiğinde dünya üzerindeki karbon yükünü doğrudan belirlemektedir. Burada, tekstil atık yönetimi senaryolarının karbon ayak izi üzerindeki net etkilerini ve söküm için tasarımlarını bilimsel verilerle incelenmektedir.

5.1. Yaşam Sonu Senaryolarının Genel Karbon Performansı ve Bertaraf Yöntemleri

Tekstil atıklarının yönetiminde geleneksel yöntemler olan vahşi depolama ve yakma, döngüsel ekonomi senaryolarıyla karşılaştırıldığında net bir küresel ısınma potansiyeli yükü oluşturmaktadır. Düzenli depolama sahalarında gaz geri kazanım sistemleri kullanılsa dahi, tekstil atıklarının bu alanlara gömülmesi çevre için kalıcı bir karbon yükü yaratmaktadır (Moazzem ve ark., 2021:1574; Abbas-Abadi ve ark., 2025:1; Santos & Abreu, 2025:1). Enerji geri kazanımlı yakma ise düzenli depolamaya kıyasla hammadde bazlı bazı çevresel etkileri azaltsa da, kentsel katı atık çalışmalarında tekstil yakımının hala kilo başına 2 kg CO₂ değerinin üzerinde kayda değer bir GWP açığa çıkardığı hesaplanmıştır (Abagnato ve ark., 2024:74; Abbas-Abadi ve ark., 2025:!) (Figür 8).

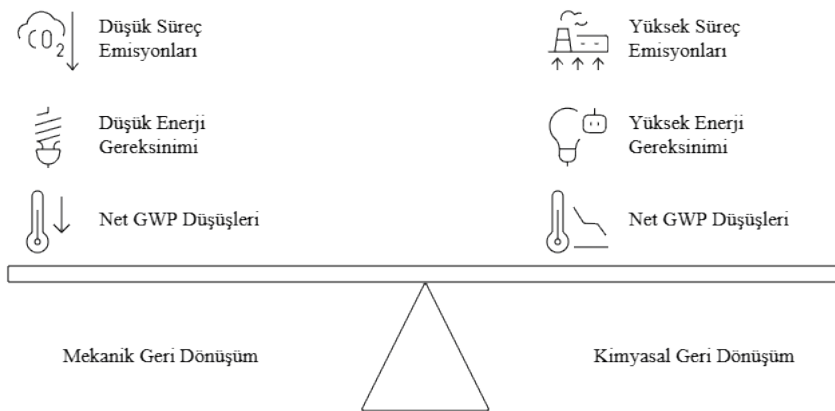


Figür 8. Tekstil atık yönetim stratejilerinin karşılaştırılması (Abagnato ve ark., 2024; Abbas-Abadi ve ark., 2025; Moazzem ve ark., 2021; Santos & Abreu, 2025)

Çevresel fayda bakımından en avantajlı senaryo olarak yeniden kullanım (reuse) öne çıkmaktadır. Avrupa tekstil fraksiyonları üzerinde yapılan Yaşam Döngüsü Analizi senaryolarında, yeniden kullanımın ton başına 2384 ila 4486 kg CO₂ (yaklaşık olarak her 1 kg tekstil için 2,4 ila 4,5 kg CO₂) arasında net bir karbon tasarrufu sağladığı kanıtlanmıştır (Abbas-Abadi ve ark., 2025:1). Yeniden kullanımın sunduğu bu devasa tasarrufun temel sebebi, saf ürün üretimi ihtiyacını ve bu üretime bağlı emisyonları doğrudan engellemesidir.

5.2. Atıkların Geri Kazanımından Elde Edilen Tasarruflar

Tekstil atıklarının katı atık depolama sahalarından veya yakma tesislerinden çekilerek geri dönüşüm süreçlerine dâhil edilmesi, hammadde türüne ve ikame (substitution) senaryolarına bağlı olarak çok ciddi karbon kazançları sunmaktadır. Güncel literatür, 1 kg tekstil atığının geri dönüştürülmesinin net olarak 0,4 ila 5,8 kg CO₂ arasında karbon tasarrufu sağladığını ortaya koymaktadır (Abagnato ve ark., 2024:74; Khan ve ark., 2025:8529). Bu süreçlerden biri olan mekanik geri dönüşümün süreç emisyonları oldukça düşüktür; nitekim Avustralya merkezli bir Yaşam Döngüsü Analizi modellemesinde, mekanik geri dönüşüm süreç emisyonlarının 1000 kg tekstil için 5368-5897 kg CO₂ ürettiği, buna karşın %100 depolama senaryosunun 8310 kg CO₂ ürettiği raporlanmıştır (Khan ve ark., 2025:8529). Bu veriler, atıkların depolanmasından kaçınmanın belirgin çevresel üstünlüğünü kanıtlamaktadır. Benzer şekilde, Avrupa Birliği (AB) senaryolarında pamuk, viskon ve poliamid mekanik geri dönüşümünün, baz senaryolara kıyasla kg başına 0,4 ila 1,3 kg arasında karbon tasarrufu sağladığı görülmektedir (Abbas-Abadi ve ark., 2025:1) (Figür 9).



Figür 9. Tekstil atık geri dönüşümünün çevresel faydaları (Abbas-Abadi ve ark., 2025; Khan ve ark., 2025; Abagnato ve ark., 2024)

Depolimerizasyon ve çözündürme gibi yöntemleri kapsayan kimyasal geri dönüşüm, mekanik yöntemle göre daha fazla enerji ve solvent gerektirmesine rağmen, yüksek verim elde edildiğinde ve saf liflerin yerini aldığı net küresel ısınma potansiyeli düşüşleri sağlamaktadır. Örneğin, AB’de polyesterin kimyasal depolimerizasyonu ile ton başına net 1149 kg CO₂ tasarruf elde edildiği saptanmıştır (Abbas-Abadi ve ark., 2025:1). Esas itibarıyla, hem mekanik hem de kimyasal geri dönüşümdeki net iklim faydasının baskın ve temel mekanizması; pamuk, polyester ve viskon gibi saf elyaf üretim süreçlerinin ve tarımsal yetiştirme aşamalarının doğrudan bypass edilerek bu aşamalardan kaynaklanacak emisyonların engellenmesidir (Karim & Hasan, 2022.; Espinoza-Pérez ve ark., 2024:1; Iqbal ve ark., 2025:1).

5.3. Lif Karışımları ve Monomateryal Tercihinin Karbon Ayak İzi Üzerindeki Etkisi

Tasarım aşamasında verilen en kritik kararlardan biri elyafın saf veya karışım (blend) olarak seçilmesidir; zira karışım elyaflar, yaşam sonunda geri dönüşüm tesislerinin karbon ve enerji faturasını doğrudan artırmaktadır. Bu noktada monomateryal seçimi büyük bir avantaj barındırmaktadır; çünkü %100 saf pamuk veya %100 saf polyester elyafların geri dönüştürülmesi en düşük enerji tüketimine ve karbon ayak izine sahiptir (Soares, 2023; Azevedo et al., 2025). Sektörde yaygın olarak kullanılan polyester-pamuk (poly-cotton) karışımları ise yakma veya depolamaya kıyasla hâlâ daha düşük bir karbon ayak izi sunsalar da (Wang & Salmon, 2022), bu farklı karakterdeki lifleri birbirinden ayırmak için gereken ön işlemler, ısıl adımlar ve karıştırma süreçleri elektrik ile ısı talebini, dolayısıyla da proses emisyonlarını ciddi oranda artırmaktadır (Abagnato ve ark., 2024:75; Ndagano ve ark., 2025:!).

Kumaşlara esneklik katması için tasarımlarda sıklıkla tercih edilen elastan (spandex) ise geri dönüşüm süreçlerinin önündeki en büyük karbon bariyeri olarak öne çıkmaktadır (Chavez-Linares ve ark., 2025:1; Choudhury ve ark., 2024:1). Elastanın poliamid veya polyesterden kimyasal olarak ayrıştırılabilmesi için özel solventler ve yüksek basınç ya da yüksek sıcaklık altında çalışan reaktörler gerekmektedir, bu teknik zorunluluklar da prosesin karbon ayak izini ve ekonomik maliyetini tırmandırmaktadır (Ghosh ve ark., 2025:11697). Tüm bu termodinamik ve metodolojik yüklerine rağmen, seçici elastan çözündürme yöntemleri gibi inovatif geri dönüşüm teknolojileri, atıkların doğrudan yakılması senaryosuna kıyasla hâlâ %60’a yakın bir emisyon tasarrufu sağlayabilmektedir (Phan ve ark., 2023:1).

5.4. Giysi Konstrüksiyonu, Aksesuarlar ve Söküm İçin Tasarım

Bir giysinin sadece kumaşı değil; üzerindeki düğmeler, fermuarlar, telalar ve dikiş iplikleri de yaşam sonu karbon performansını doğrudan etkilemektedir. Güncel literatür, tasarımcıların konstrüksiyonu basitleştirerek geri dönüşüm verimliliğini nasıl artırabileceğini açıkça doğrulamaktadır. Giysilerdeki aksesuarlar, fermuarlar ve metal düğmeler gibi küçük parçalar, üzerlerindeki kaplama ve uygulanan ısıl işlemler nedeniyle oldukça yüksek bir karbon yoğunluğuna sahiptir. Nitekim bitmiş bir giysinin toplam yaşam döngüsü emisyonunun %1 ila %6'sını bu küçük aksesuarlar oluşturmaktadır (Biswas ve ark., 2026:1). Ancak aksesuar üretiminde yenilenebilir enerji ve geri dönüştürülmüş girdilerin kullanılması, bu parçalardan kaynaklanan karbon yükünü %48 oranında azaltabilmektedir. Diğer taraftan astar, metal fermuarlar ve perçinler gibi çoklu bileşene sahip karmaşık giysi konstrüksiyonları, geri dönüşüm öncesindeki mekanik ayıklama süreçlerini yavaşlatarak yapısal birer engel oluşturmaktadır (Abbas-Abadi ve ark., 2025:1). Bu doğrultuda fermuarların ve sabitleyicilerin kolayca sökülebilir şekilde tasarlanması, elyaf geri kazanım oranını doğrudan yükseltmektedir.

Bu yapısal engelleri aşmak adına geliştirilen Söküm İçin Tasarım teknolojileri, döngüsellikte kritik bir rol oynamaktadır. Isı veya mikrodalga etkisiyle belirli bir sıcaklıkta eriyerek ya da çözülerek parçalanan özel DfD dikiş ipliklerinin kullanılması, kumaş panellerinin kesilip ziyan edilmeden, büyük parçalar halinde ve yüksek kalitede mekanik geri dönüşüme girmesini sağlamaktadır (Abbas-Abadi ve ark., 2025:1). Yapay zeka destekli modüler tasarım uygulamaları ile sökülebilir çitçit arayüzlerini içeren pilot çalışmalar; söküm verimliliğini 2-3 kat artırırken, %97 oranında polyester geri kazanım başarısı yakalamıştır. Bu tür modüler tasarım yaklaşımları giysilerin kullanım ömrünü de uzatarak saf ham madde üretimi ihtiyacını azaltmakta ve dolaylı yoldan çok ciddi bir karbon tasarrufu elde edilmesine imkan tanımaktadır (Semba ve ark., 2020:1; Ramzan ve ark., 2023:1).

5.5. Biyo-bozunabilir Depolama ve Sentetik Kapalı Döngü Geri Dönüşüm

Moda sektöründeki popüler yanılgılardan biri, doğal ve biyo-bozunabilir liflerin landfill (depolama) alanlarında çevreye hiçbir zarar vermeden kendiliğinden yok olacağı algısıdır. Ancak bilimsel Yaşam Döngüsü Analizi verileri, bu yaygın inanın tam aksini ortaya koymaktadır. Pamuk, kenevir veya viskon gibi bitki bazlı doğal lifler, düzenli depolama sahalarında oksijensiz ortamda bozduklarında çok ciddi sera gazı emisyonlarına, özellikle de karbondioksit'e kıyasla küresel ısınma potansiyeli kat kat yüksek olan metan

gazı salımına neden olmaktadır (Ribul ve ark., 2021:1). Bazı matematiksel modellerde kenevir gibi belirli liflerin karbon depolama efektiyle bu emisyonları sadece zamansal olarak geciktirdiği görülse de, bu durum gerçek bir emisyon önleme yöntemi teşkil etmemektedir (Liu ve ark., 2024:1:). Bu nedenle, biyobozunabilir liflerin doğrudan katı atık sahalarında depolanması, iklim azaltım stratejileri kapsamında ancak en son çare olarak kabul edilmelidir.

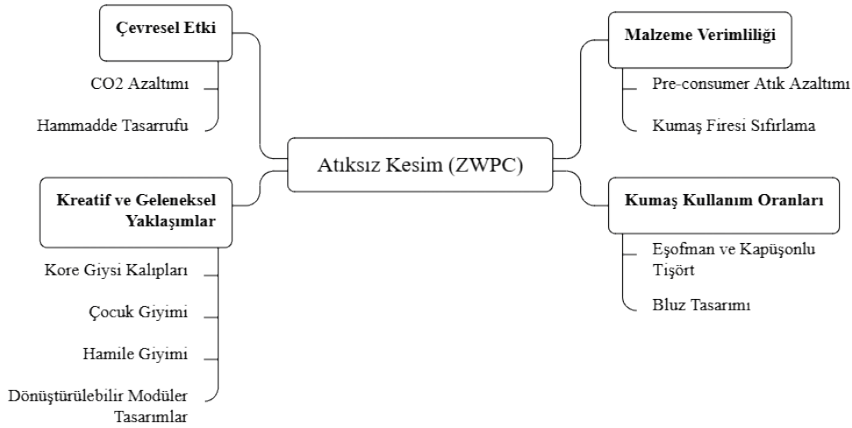
Polyester gibi sentetik tekstillerin katı atık sahalarından tamamen uzaklaştırılarak sentetik kapalı döngü geri dönüşüm sistemlerine dahil edilmesi, net karbon emisyonlarını azaltmada çok daha etkilidir; nitekim bu yaklaşım, doğal elyafları landfill alanlarında çürümeye terk etmekten çok daha net, kararlı ve ölçülebilir bir iklim azaltım faydası sunmaktadır (Filho ve ark., 2024:1; Hammar ve ark., 2024:1880). Yapılan çalışmalar, döngüsel polyester rotalarının saf polyester üretimine kıyasla %38 ila %85 arasında değişen oranlarda daha az fosil enerji tüketimi ve muazzam bir GWP avantajı sağladığını doğrulamaktadır (Soares, 2023.; Berger & Pfeifer, 2024:6251).

6. Karbon Odaklı Eko-Tasarım Stratejileri ve Pratik Uygulama Rehberi

Tasarım aşaması, bir giysinin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkacak çevresel etkilerin yaklaşık %80'inin kilitlendiği kritik bir eştir. Bu bölümde, tasarımcıların stüdyoda, kalıp masasında veya dijital ekran başında alacağı kararların karbon ayak izi ve malzeme verimliliği üzerindeki somut etkileri, güncel akademik literatürün (2021–2026) nicel verileri ışığında incelenmektedir.

6.1. Atıksız Kesim (Zero-Waste Pattern Cutting - ZWPC) ve Malzeme Verimliliği

Geleneksel konfeksiyon üretiminde, kumaş serim ve kesim aşamalarında malzemenin ortalama %15'i doğrudan üretim öncesi (pre-consumer) atık olarak fireye ayrılmaktadır (Ramkalan & Sayem, 2021:809; Gupta ve ark., 2022). Atıksız Kesim (ZWPC) metodolojisi, kumaş firesini %15'in altına düşürmeyi, ideal senaryoda ise sıfırlamayı hedefleyen bir tasarım ve kalıp yerleşim stratejisidir (Nursari ve ark., 2024:124; Heo & Kim, 2025) (Figür 10).



Figür 10. Atıksız kesim ve malzeme verimliliği (Ramkalaon & Sayem, 2021; Gupta ve ark., 2022; Nursari ve ark., 2024; Heo & Kim, 2025)

Kitleli üretim odaklı ZWPC çerçevelerinde, eşofman ve kapüşonlu tişört gibi ürünlerde %98'in üzerinde kumaş kullanım verimliliği (marker efficiency) elde edilmiştir (ElShishtawy ve ark., 2021:187). Endüstriyel ölçekte üretilebilir bir atıksız kesim bluz tasarımında kalıp verimliliğinin %99,48'e ulaştığı belgelenmiştir (Marin ve ark., 2024:171). Geleneksel Kore giysi kalıplarından esinlenen modern eko-tasarım uygulamaları, kumaş firesini %0,6 ila %6 bandına çekmeyi başarmıştır (Kim & Kim, 2023:198). Çocuk giyimi, hamile giyimi ve dönüştürülebilir modüler tasarımlarda da ZWPC'nin üretim öncesi atıkları neredeyse tamamen ortadan kaldırdığı doğrulanmaktadır (Gupta & Sharma, 2024;; McKinney, 2024).

2021–2026 literatürü incelendiğinde, ZWPC uygulanan bir giysinin, geleneksel bir giysiye kıyasla bitmiş ürün ölçeğinde tam olarak yüzde kaç net GWP (CO₂) azaltımı sağladığına dair uçtan uca eksiksiz bir LCA çalışması bulunmamaktadır. Etki mekanizması hammadde tasarrufu üzerinden dolayı olarak hesaplanmaktadır. Tekstil kumaş üretiminin kilo başına 3.65 ila 14.07 kg CO₂ gömülü karbon yükü taşıdığı göz önüne alınırsa, endüstrideki %15'lik kesim firesinin ZWPC ile %85 ila %100 oranında azaltılması, küresel ölçekte çok ciddi bir mutlak emisyonun önüne geçmektedir (Ramkalaon & Sayem, 2021:809).

6.2. Giysi Ömrünü Uzatmanın Kaldıraç Etkisi

Kullanım döngüsünü uzatmak ve giysilerin aktif olarak giyilme sayısını artırmak, ürün başına düşen GWP emisyonunu azaltmanın en güçlü kaldıraç mekanizmasıdır. Bu strateji, yeni bir ürün satın alma ihtiyacını doğrudan

öteleyerek veya engelleyerek sistem genelindeki hammadde üretim emisyonlarını ortadan kaldırmaktadır (Wiedemann ve ark., 2020:1; Klepp ve ark., 2020:1).

- **Giyim Sayısının Artırılması:** Bir merinos yün kazağın toplam kullanım ömrününün 109 giyimden 400 giyime çıkarılması, giyim başına düşen küresel ısınma potansiyelini (GWP) %60 ila %68 oranında düşürmektedir (Maldini ve ark., 2019:1414; Wiedemann ve ark., 2021:1188). Benzer şekilde, bir jean pantolonun doğru bakım protokolleriyle 52 kez yerine 104 kez giyilmesi (iki kat artış), giyim başına karbon yükünü %50 azaltmaktadır (Zuin ve ark., 2025).
- **Zaman Tabanlı Ömür Uzatma:** Yapılan çalışmalar, bir giysinin ortalama aktif ömrününün sadece 9 ay uzatılması durumunda, gardırop ölçüğünde karbon, su ve atık ayak izinin %20 ila %30 oranında azaldığını göstermektedir (Jučienė ve ark., 2025:1). Bir pamuklu pantolonun 4 yılda bir değiştirilmesi yerine 8-12 yıl boyunca korunması, sera gazı emisyonlarını %28 ila %41 oranında düşürmektedir (Pires et al., 2024).

6.3. Modüler Tasarım ve Çok Fonksiyonlu Giysilerin Karbon İkame Potansiyeli

Modüler moda (çıkarılabilir kollar, paneller, güncellenebilir parçalar) ve çok fonksiyonlu giysiler (farklı bağlama kombinasyonları sunan tek bir ürün), yavaş moda akımının en önemli tasarım stratejileridir (Le ve ark., 2025:50<).

- **Tüketim İkamesi:** Modüler tasarımlar kendi başlarına GWP'yi düşürmekte; ancak tüketicinin yeni bir ürün satın alma davranışını engellediği senaryolarda giyim başına %60 ila %75 arasında değişen devasa bir karbon tasarrufu sağlamaktadır (Wiedemann ve ark., 2023). Giysi takas (swap) organizasyonları üzerinden yapılan bir ölçümlemede, 251 takas operasyonunun yeni üretimi engellemesi sayesinde net 4203 kg CO₂ emisyonunun önüne geçilmiştir (Jučienė ve ark., 2025).
- **Yaşam Sonu ve Geri Dönüşüm Kolaylığı:** Modüler konstrüksiyonlar geri dönüşüm aşamasında da karbon verimliliği sağlamaktadır. Standart arayüzler ve sökülebilir modüler klipsler içeren yapay zeka destekli bir ceket tasarımında, pamuk-polyester karışımlarında %92, saf polyesterde ise %97 oranında malzeme geri kazanım başarısı elde edilmiştir. Bu yöntem, geleneksel mekanik parçalamaya (grinding) kıyasla lif geri kazanım verimliliğini 2-3 kat artırarak saf hammaddeye olan bağımlılığı ve dolayısıyla dolaylı emisyonları minimize etmektedir.

6.4. Dijital Prototipleme (3D Sampling) vs. Fiziksel Numune Emisyonları

Tasarım ve ürün geliştirme evresinde fiziksel numune dikimi, revizyonlar, kargo ve lojistik süreçlerinin yarattığı karbon yükü, 3D dijital giysi simülasyonları (CLO3D, Browzwear vb.) ile önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

- **Fire ve Yineleme Azaltımı:** Tasarım süreçlerine CLO3D entegrasyonu sağlayan vaka analizlerinde, fiziksel numune yinelemelerinin (iterations) %76 oranında azaldığı ve tasarım aşamasındaki kumaş firesinin %15 ila %20 oranında önlendiği raporlanmıştır (Kong & Wu, 2025:45). Genel endüstriyel dönüşüm verileri, dijital iş akışlarının fiziksel numune ihtiyacını %60 ila %80 oranında düşürdüğünü (stil başına 3-5 adet olan numuneyi 1-2 adede indirdiğini) göstermektedir (Mesjar ve ark., 2023). Stil başına ortalama 3,1 adet fiziksel numune üretiminin tamamen ortadan kaldırılması mümkündür (Çetin ve ark., 2021:1).
- **Tasarım Evresi Karbon Kazancı:** Dijital numune kullanımına geçiş, ürün geliştirme aşamasının karbon ayak izini ortalama %28 (varyasyonel olarak %15 ila %35) oranında düşürmektedir (Çetin ve ark., 2021:1). Bu tasarruf; azaltılan kumaş metrajından, numune dikim enerjisinden, uluslararası kargo-lojistik hatlarından ve paketleme malzemelerinden kaynaklanmaktadır.

Tasarım ve numunelendirme aşaması, bir giysinin toplam beşikten-mezara (cradle-to-grave) yaşam döngüsü emisyonunun yalnızca %3 ila %5'lik küçük bir dilimini oluşturmaktadır (Çetin ve ark., 2021:1). Dolayısıyla dijital numunelendirmenin sağladığı %28'lik karbon tasarrufu, ürünün toplam ayak izine değil, bu %3-5'lik tasarım aşaması dilimine etki etmektedir. Tamamen dijital olarak tüketilen (fiziksel olarak hiç üretilmeyen/DressX örneği) sanal giysiler ise fiziksel bir giysiye kıyasla %97 daha az emisyon üretmektedir (Casciani ve ark., 2022:773).

7. Gelecek Senaryoları, Regülasyonlar ve Dönüşen Tasarımcı Roller

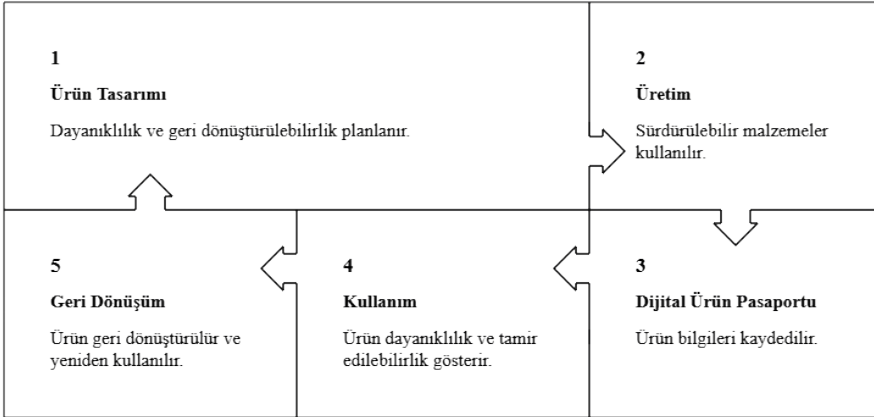
Tekstil endüstrisinde sürdürülebilirlik, yakın geçmişe kadar markaların pazarlama stratejilerine hizmet eden gönüllü bir yeşil taahhüt veya niş bir pazar tercihi olarak konumlanmıştır. Ancak 2021–2026 dönemini kapsayan güncel literatür ve küresel ticaret mekanizmaları, ekotasarım ve izlenebilirliği bir lüks olmaktan çıkarıp yasal bir zorunluluk ve birincil tasarım parametresi haline getirmiştir. Sektör; Avrupa Birliği'nin radikal mevzuat adımları, karbon sınır vergileri ve dijital altyapı zorunlulukları ile tarihinin en büyük yapısal dönüşümünü yaşamaktadır. Bu bölüm, yakın gelecekte moda tasarımcılarının

ve ürün geliştiricilerin uymak zorunda olduğu yasal çerçeveyi, karbon odaklı tedarik zinciri maliyetlerini ve bu ekosistem içinde evrilen yeni çok disiplinli meslek tanımlarını akademik verilerle analiz etmektedir.

7.1. AB Mevzuatları: ESPR ve Dijital Ürün Pasaportu (DPP)

Avrupa Komisyonu tarafından yürürlüğe konulan Sürdürülebilir Ürünler için Ekotasarım Yönetmeliği (ESPR), fiziksel ürünlerin yaşam döngüsünü baştan sona yeniden tanımlamaktadır. ESPR; geleneksel enerji verimliliği odaklı ekotasarım mantığını genişleterek; ürünlerin dayanıklılığı, yeniden kullanılabilirliği, tamir edilebilirliği, yükseltilebilirliği, geri dönüştürülebilirliği, geri dönüştürülmüş içerik oranı ve tehlikeli kimyasallardan arındırılmış olması gibi döngüsel ekonomi kriterlerini neredeyse tüm fiziksel mallar için zorunlu kılmaktadır (Stadler vd., 2025; Vrendenbarg, 2025:525; Zhu & Liu, 2025:1). Bu yasal düzenlemede tekstil ve hazır giyim ürünleri, çevresel ayak izlerinin yüksekliği nedeniyle açık ara öncelikli ürün grubu olarak ilan edilmiştir.

Bu doğrultuda, tekstil işletmeleri için çevresel sürdürülebilirlik performans standartları minimum yasal eşiklere bağlanmış, satılmayan veya iade edilen tekstil ürünlerinin imha edilmesi tamamen yasaklanmıştır (Stadler vd., 2025). Tasarımcılar için bu durum, estetik ve trend odaklı tasarım süreçlerinden, ürün geliştirme aşamasında söküm, tamir edilebilirlik ve malzeme ayrışımını planlayan uzun ömürlü/dayanıklı tasarım metodolojisine zorunlu bir geçiş anlamına gelmektedir (Vrendenbarg, 2025:525; Zhu & Liu, 2025:1) (Figür 11).



Figür 11. ESPR döngüsü (Vrendenbarg, 2025; Zhu & Liu, 2025)

ESPR'nin operasyonel kalbini Dijital Ürün Pasaportu (DPP) oluşturmaktadır. DPP; her bir giysinin üzerinde fiziksel bir veri taşıyıcı (QR kod veya RFID çip) vasıtasıyla erişilebilen, ürüne özgü dijital bir bilgi deposudur (Carvalho vd., 2025; Abreu vd., 2025). Tekstil sektörü için DPP'nin 2030 yılına kadar tam kapsamlı olarak işletilmesi hedeflenirken, ilk zorunlu pilot ürün grupları 2024-2026 yılları arasında devreye alınmaya başlanmıştır (Carvalho vd., 2025:1; D'Adamo vd., 2025:9008). Tekstil DPP veri setleri şu kritik katmanları içermektedir:

- **Malzeme Bileşimi ve Menşei:** Lif içeriği, hammadde kaynağı ve tedarik zinciri izlenebilirliği.
- **Kimyasal Profil:** Üründe kullanılan boyar maddeler, apreler ve tehlikeli kimyasalların mevcudiyeti/yokluğu.
- **Döngüsellik Kılavuzları:** Tamir edilebilirlik yönergeleri, ikinci el kullanım potansiyeli ve optimize edilmiş geri dönüşüm rotaları (Zhang & Seuring, 2024:25 13; Psarommatis & May, 2024:1).

Blockchain ve model tabanlı DPP prototipleri üzerinde yapılan çalışmalar, bu verilerin tasarım bittikten sonra ürüne eklenemeyeceğini; izlenebilirlik ve veri yakalama mekanizmalarının henüz ilk fikir ve eskiz aşamasında ürün teknik föylerine entegre edilmesi gerektiğini kanıtlamaktadır (Abreu vd., 2025:5863; Juresa vd., 2025:43).

7.2. Karbon Vergilendirmesi ve Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM)

Sürdürülebilirlik dinamiklerinin ekonomik ayağını küresel karbon fiyatlandırma politikaları ve AB'nin Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması oluşturmaktadır. Tekstil ve hazır giyim tedarik zincirleri boyunca uygulanan karbon vergilerinin etkileri, karmaşık optimizasyon modelleriyle sayısal olarak hesaplanmıştır.

Yapılan Yaşam Döngüsü Analizi ve Karışık Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama modellemeleri; hammaddeden bitmiş ürüne kadar ton başına 45-85\$ arasında uygulanan bir karbon vergisinin, tekstil tedarik zincirinde toplam maliyetleri ortalama %2 oranında artırdığını göstermektedir. Ancak bu maliyet artışına karşılık, orta ve uzun vadeli planlama ufuklarında karbon emisyonları ve fason üretim bağımlılığı net bir şekilde düşüş kaydetmektedir. Kısa vadeli planlamalar ise emisyon azaltımı sağlamadığı gibi işletmelere daha yüksek mali yükler getirmektedir; bu da karbon odaklı vergilendirmeler altında başarılı bir dekarbonizasyonun ancak uzun vadeli stratejik tasarım ve tedarik kararlarıyla mümkün olduğunu ortaya koymaktadır (Mezatio vd., 2023:1).

Giyim endüstrisindeki Stackelberg oyun teorisi modellemelerine göre, üretici düzeyinde yükselen karbon vergileri, imalat aşamasında daha agresif emisyon azaltım teknolojilerine yatırımı tetiklemekte ve nihai ürün emisyonlarını düşürmektedir. Bu durum pazar genelinde talep yapısını ve yeşil ürünlerin perakende satış fiyatını yükseltirken, tedarik zincirinin toplam kârlılığında bir miktar daralmaya yol açmaktadır (Lang vd., 2021:). Dinamik Rastsal Genel Denge modelleri de makul düzeydeki bir karbon vergisinin emisyonları etkili şekilde dizginlediğini, ancak aşırı ve ölçsüz vergilendirmenin endüstriyel üretime zarar verebileceğini; en optimal senaryonun yüksek karbon vergisi ve düşük yeşil sübvansiyon kombinasyonu ile çevresel kaliteyi hızla artırmak olduğunu doğrulamaktadır (Liu vd., 2024:!).

7.3. Moda Endüstrisinde Dönüşen ve Yeni Gelişen Profesyonel Roller

Karbon vergilerinin yarattığı veri yoğun ve mevzuat güdümlü yeni ekosistem, moda tasarımcısının geleneksel rolünü kökten değiştirerek çok disiplinli, hibrit profillerin doğmasına yol açmıştır. Klasik estetik ve silüet odaklı tasarımcı figürü yerini, tasarım yeteneklerini veri bilimi, malzeme mühendisliği ve çevresel etki analiziyle birleştiren yeni profesyonel rollere bırakmaktadır. Literatürde öne çıkan üç temel rol kümesi şu şekildedir:

- Döngüsel Moda ve Ekotasarım Tasarımcısı (Circular Fashion / CE Designer): Döngüsel ekonomiye geçiş yapan organizasyonlarda tasarımcılar; uzun ömürlülük, çoklu yaşam döngüleri, ileri dönüşüm, parça değişimi ve geri kazanım stratejilerine liderlik eden stratejik aktörlere dönüşmektedir (Dan & Østergaard, 2021:1001; Abdelmeguid vd., 2024:143). Bu profesyoneller, bir giysinin ömrünü tamamladıktan sonra nasıl bileşenlerine ayrılacağını henüz çizim aşamasında planlanmakta ve kurum içinde döngüsel iş modellerinin geliştirilmesinde birer “değişim ajanı” (change agent) olarak rol oynamaktadır (Sumter vd., 2020:1).
- Dijital ve 3D Moda Teknoloğu / Moda Operatörü 4.0: Fiziksel numune üretimini ortadan kaldırarak hammadde israfını ve karbon ayak izini sıfırlayan 3D simülasyon (CLO 3D, Browzwear vb.), sanal prototipleme, yapay zeka destekli ekotasarım ve vücut tarama teknolojilerinden tersine mühendislik yapabilen uzman kadrolardır (Liang vd., 2025; Casciani & D'Itria, 2024:!). Literatürde Cyborg Designer 4.0 olarak da adlandırılan bu profil, makine öğrenmesi algoritmalarıyla çalışarak hem dijital evren (metaverse) hem de fiziksel dünya için optimize edilmiş sürdürülebilir ürünler geliştirmektedir (Sayem, 2022:139; Roberts & Bailey, 2025:65).

- Döngüsel/YDA Tasarım Uzmanı ve Veri Yöneticisi: Tasarım kararlarının çevresel etkilerini metriklerle ölçen, döngüsellik kriterlerini ve LCA sonuçlarını ürün geliştirme sürecine entegre eden uzmanlık alanıdır (Sumter vd., 2021; Beducci vd., 2024). Aynı zamanda, DPP'nin gerektirdiği blockchain, IoT ve dijital kimlik tabanlı geniş veri kümelerini yöneterek, giysinin izlenebilirlik kodlarını tasarıma entegre eden ve tedarik zinciri boyunca şeffaf veri akışını sağlayan disiplinler arası bir köprü görevi görürler (Casciani & D'Itria, 2024:1; Wiegand & Wynn, 2023).

7.4. Değer Zinciri Etkileri ve Tüketici Algısı

Dijital ve yeşil dönüşüm, kurumsal düzeyde ve küresel değer zincirlerinde sorumlulukları yeniden dağıtmaktadır. ESPR ve Kurumsal Sürdürülebilirlik Özen Yükümlülüğü Direktifi, özellikle küresel tedarik zincirlerindeki Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeleri (KOBİ) ciddi bir uyum baskısı altında bırakmaktadır. Ancak şeffaflık araçları ve netleşen standartlar, bu işletmeler için döngüsel iş modellerine (kiralama, tamir servisleri, yeniden satış) erişimde yeni pazar fırsatları da yaratmaktadır (Stadler vd., 2025.; Zhang & Seuring, 2024:2513).

Stratejik konumlandırma açısından en çarpıcı veri ise tüketici kanadından gelmektedir. Güncel anket çalışmaları ve tüketici araştırmaları, son tüketicilerin dijital etiketlere ve DPP tabanlı şeffaflık araçlarına yüksek düzeyde güven duyduğunu ortaya koymaktadır. Dahası, tüketicilerin DPP etiketine sahip, hikayesi ve çevresel etki verileri doğrulanabilir sürdürülebilir moda ürünleri için yaklaşık %17 oranında daha fazla ödeme yapmaya gönüllü oldukları tespit edilmiştir (Colasante vd., 2025:9242). Bu veri, tasarım süreçlerinde ekotasarım ve veri entegrasyonuna yapılan yatırımların, markalar için sadece bir maliyet kalemi değil, doğrudan pazar payını ve marka değerini artıran stratejik bir kaldıraç olduğunu kanıtlamaktadır.

Bu kapsamlı teknik rapor boyunca incelenen tüm parametreler göstermektedir ki; tekstil ve hazır giyim sektörü artık doğrusal al-yap-at modelini tamamen terk etmek zorundadır. Mekanik ve kimyasal geri dönüşüm yöntemlerinin kendilerine has karbon ayak izleri ve malzeme kalitesi sınırları, elyaf karışımlarının ayrıştırılmasındaki teknik zorluklar ve eko-tasarım esnasındaki malzeme kararları , tekstil atık yönetiminin bütünsel bir Yaşam Döngüsü Analizi yaklaşımıyla ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

2021-2026 literatürünün net bir şekilde ortaya koyduğu üzere, ESPR ve DPP gibi yasal düzenlemeler ile karbon fiyatlandırma mekanizmaları, bu teknik gereklilikleri yasal birer zorunluluk haline getirmiştir. Geleceğin başarılı moda

markaları ve tasarımcıları, giysileri yalnızca estetik birer nesne olarak değil; hammaddesinden dijital kimliğine, tamir yönergelerinden karbon emisyon optimizasyonuna kadar bütünsel, izlenebilir ve döngüsel birer sistem olarak tasarlayanlar olacaktır.

Kaynakça

- Abagnato, S., Rigamonti, L., & Grosso, M. (2024). Life cycle assessment applications to reuse, recycling and circular practices for textiles: A review. *Waste Management*, 182, 74-90.
- Abbate, S., Centobelli, P., Cerchione, R., Nadeem, S. P., & Riccio, E. (2024). Sustainability trends and gaps in the textile, apparel and fashion industries: S. Abbate et al. *Environment, development and sustainability*, 26(2), 2837-2864.
- Abdelmeguid, A., Afy-Shararah, M., & Salonitis, K. (2024). Towards circular fashion: Management strategies promoting circular behaviour along the value chain. *Sustainable Production and Consumption*, 48, 143-156.
- Abreu, H., Pereira, V., & Barata, J. (2025). Blockchain-based digital product passport: design principles and demonstration. *International Journal of Production Research*, 63(16), 5863-5882.
- Auerbach George, H., Tregenza, L., Stenton, M., Kapsali, V., Blackburn, R. S., & Houghton, J. A. (2023). Challenging perceptions of fast and slow in contemporary fashion: A review of the paper dresses trend in the United Kingdom and the United States during the 1960s. *International Journal of sustainable fashion & textiles*, 2(1), 29-52.
- Azevedo, T., Silva, A. C., Machado, G., Chaves, D., Ribeiro, A. I., Figueiro, R., & Ferreira, D. P. (2025). Reinforcing cotton recycled fibers for the production of high-quality textile structures. *Polymers*, 17(10), 1392.
- Bailey, K., Basu, A., & Sharma, S. (2022). The environmental impacts of fast fashion on water quality: a systematic review. *Water*, 14(7), 1073.
- Beducci, E., Acerbi, F., Pinzone, M., & Taisch, M. (2024). Unleashing the role of skills and job profiles in circular manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141456.
- Berger, N. J., & Pfeifer, C. (2025). Comparing the financial costs and carbon neutrality of polyester fibres produced from 100% bio-based PET, 100% recycled PET, or in combination. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(4), 6251-6268.
- Bher, A., & Auras, R. (2024). Life cycle assessment of packaging systems: A meta-analysis to evaluate the root of consistencies and discrepancies. *Journal of Cleaner Production*, 476, 143785.
- Bianco, I., De Bona, A., Zanetti, M., & Panepinto, D. (2023). Environmental impacts in the textile sector: A life cycle assessment case study of a woolen undershirt. *Sustainability*, 15(15), 11666.
- Biswas, M. K., Preeti, I. A., Rimzhim, T. R., Li, W., Islam, S., Biswas, K. F., ... & Sujauddin, M. (2026). The hidden environmental footprint of fashion's smallest parts. *Sustainable Horizons*, 18, 100179.

- Bodoga, A., Nistorac, A., Loghin, M. C., & Isopescu, D. N. (2024). Environmental impact of footwear using life cycle assessment—case study of professional footwear. *Sustainability*, *16*(14), 6094.
- Camargo, L. R., Pereira, S. C. F., & Scarpin, M. R. S. (2020). Fast and ultra-fast fashion supply chain management: an exploratory research. *International Journal of Retail & Distribution Management*, *48*(6), 537-553.
- Carvalho, C., Silva, C. J., & Abreu, M. J. (2025). Circular economy: Literature review on the implementation of the digital product passport (DPP) in the textile industry. *Sustainability*, *17*(5), 1802.
- Casciani, D., & D'Itria, E. (2024). Fostering directions for digital technology adoption in sustainable and circular fashion: toward the circular fashion-tech lab. *Systems*, *12*(6), 190.
- Casciani, D., Chkanikova, O., & Pal, R. (2022). Exploring the nature of digital transformation in the fashion industry: opportunities for supply chains, business models, and sustainability-oriented innovations. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, *18*(1), 773-795.
- Catarino, M. L., Sampaio, F., & Gonçalves, A. L. (2025). Sustainable wet processing technologies for the textile industry: A comprehensive review. *Sustainability*, *17*(7), 3041.
- Chatty, T., Qu, Y., Ba-Sabaa, H. H., & Murnane, E. L. (2021). Examining the user experience of life cycle assessment tools and their ability to cater to ecodesign in early-stage product development practice. *Proceedings of the Design Society*, *1*, 1441-1450.
- Chavez-Linares, P., Hoppe, S., & Chevalot, I. (2025). Recycling and degradation pathways of synthetic textile fibers such as polyamide and elastane. *Global Challenges*, *9*(4), 2400163.
- Choudhury, K., Tsianou, M., & Alexandridis, P. (2024). Recycling of blended fabrics for a circular economy of textiles: separation of cotton, polyester, and elastane fibers. *Sustainability*, *16*(14), 6206.
- Colasante, A., D'Adamo, I., Desideri, S., Iannilli, M., & Mangani, V. (2025). Environmental concerns in the fashion industry: a twin transition with the digital product passport. *Business Strategy and the Environment*, *34*(7), 9242-9256.
- Coşkun, S., & Doğan, N. (2021). Tekstil endüstrisinde karbon ayak izinin belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *25*(1), 28-35.
- Çetin, S., De Wolf, C., & Bocken, N. (2021). Circular digital built environment: An emerging framework. *Sustainability*, *13*(11), 6348.
- D'Adamo, I., Fratocchi, L., Grosso, C., & Tavana, M. (2025). An integrated business strategy for the twin transition: leveraging digital product passports

- and circular economy models. *Business Strategy and the Environment*, 34(7), 9008-9022.
- Dan, M. C., & Østergaard, T. (2021). Circular fashion: The new roles of designers in organizations transitioning to a circular economy. *The Design Journal*, 24(6), 1001-1021.
- Dhiwar, K., & Bedarkar, M. (2025). Life cycle assessment in fashion industry: a systematic review. *Discover Sustainability*, 6(1), 1-19.
- Dzhengiz, T., Haukkala, T., & Sahimaa, O. (2023). (Un) Sustainable transitions towards fast and ultra-fast fashion. *Fashion and Textiles*, 10(1), 19.
- ElShishtawy, N., Sinha, P., & Bennell, J. A. (2022). A comparative review of zero-waste fashion design thinking and operational research on cutting and packing optimisation. *International Journal of Fashion design, technology and education*, 15(2), 187-199.
- Espinoza-Pérez, L. A., Espinoza-Pérez, A. T., & Vásquez, Ó. C. (2024). Life cycle assessment of alternatives for industrial textile recycling. *Science of the Total Environment*, 927, 172161.
- Fonseca, A., Ramalho, E., Gouveia, A., Henriques, R., Figueiredo, F., & Nunes, J. (2023). Systematic insights into a textile industry: Reviewing life cycle assessment and eco-design. *Sustainability*, 15(21), 15267.
- Ghosh, J., Repon, M. R., Rupanty, N. S., Asif, T. R., Tamjid, M. I., & Reukov, V. (2025). Chemical valorization of textile waste: advancing sustainable recycling for a circular economy. *ACS omega*, 10(12), 11697-11722.
- Gonçalves, A., & Silva, C. (2021). Looking for sustainability scoring in apparel: A review on environmental footprint, social impacts and transparency. *Energies*, 14(11), 3032.
- Gonzalez, V., Lou, X., & Chi, T. (2023). Evaluating environmental impact of natural and synthetic fibers: a life cycle assessment approach. *Sustainability*, 15(9), 7670.
- Goridkov, N., Wang, Y., & Goucher-Lambert, K. (2025). Empowering designers to create life cycle informed products: heuristics for extracting insights from LCA reports. *Design Science*, 11, e27.
- Guo, S., Li, X., Zhao, R., & Gong, Y. (2021). Comparison of life cycle assessment between lyocell fiber and viscose fiber in China. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(8), 1545-1555.
- Gupta, I., & Sharma, R. (2024). Adopting zero-waste pattern-making techniques for apparel product development. *Journal of the Institution of Industrial and Forensic Textile Sciences*.
- Gupta, R., Kushwaha, A., Dave, D., & Mahanta, N. R. (2022). Waste management in fashion and textile industry: Recent advances and trends, life-cycle assessment, and circular economy. *Emerging trends to approaching zero waste*, 215-242.

- Hammar, T., Peñaloza, D., & Hanning, A. C. (2024). Life cycle assessment of a circular textile value chain: The case of a garment made from chemically recycled cotton. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(10), 1880-1898.
- Hassan, S. R., Megahed, N. A., Eleinen, O. M. A., & Hassan, A. M. (2022). Toward a national life cycle assessment tool: Generative design for early decision support. *Energy and Buildings*, 267, 112144.
- He, Q., Wu, X., & Ding, X. (2025). Uncertainty in the Carbon Footprint accounting and evaluation of textile and apparel products: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 492, 144885.
- Heo, S., & Kim, S. (2025). Automatic zero-waste garment pattern generation for optimal fabric utilization. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 20, 15589250251401683.
- Imran, S., Mujtaba, M. A., Zafar, M. M., Hussain, A., Mehmood, A., Farwa, U. E., ... & Saleel, C. A. (2023). Assessing the potential of GHG emissions for the textile sector: A baseline study. *Heliyon*, 9(11).
- Iqbal, M. W., Ramzan, M. B., Manzoor, H., & Qureshi, S. M. (2025). Value extraction from end-of-life textile products in Pakistan. *Recycling*, 10(3), 101.
- Jučienė, A., Gurauskienė, I., & Kruopienė, J. (2025). Calculating the environmental impact reduction due to extended lifespan of clothing through clothing swaps. *Sustainability*, 17(10), 4411.
- Juresa, Y., Mollahassani, D., & Göbel, J. C. (2025). Towards Model-based Definition of Digital Product Passports Supporting Sustainable Smart Product Lifecycles. *Tehnički glasnik*, 19(s1), 43-48.
- Kadem, F. D., & Ozan, R. (2024). Life cycle assessment (LCA) of single Jersey knitted fabrics containing recycled cotton fiber and fabric performance. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(3), 821-830.
- Kamalakkannan, S., & Kulatunga, A. K. (2021). Optimization of eco-design decisions using a parametric life cycle assessment. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1297-1316.
- Kaynak, E., Piri, I. S., & Das, O. (2025). Revisiting the basics of life cycle assessment and lifecycle thinking. *Sustainability*, 17(16), 7
- Khan, M. I., Islam, M. T., Wang, L., & Padhye, R. (2025). Comparative energy demand and carbon footprint analysis of textile waste management systems in Australia. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(13), 8529-8546.
- Kim, S., & Kim, H. Y. (2023). Creative exploration: zero-waste fashion design practices with traditional Korean clothing. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 16(2), 198-213.
- Kimutai, I. K., & Kimutai, S. K. (2023). Energy utilization and saving opportunities in process industries: Case study of textile manufacturing industry

- in Kenya. *International Journal of Latest Technology Engineering and Management Applications Science*, 12, 86-95.
- Klepp, I. G., Laitala, K., & Wiedemann, S. (2020). Clothing lifespans: What should be measured and how. *Sustainability*, 12(15), 6219.
- Kong, X., & Wu, Y. (2025). Research on the Construction and Application of a Full-Path Optimization System for Independent Designer Brands based on CLO3D. *Highlights in Art and Design*, 15(1), 45-52.
- Kumar, D., Maurya, K. K., Mandal, S. K., Mir, B. A., Nurdiaiwati, A., & Al-Ghamdi, S. G. (2025). Life cycle assessment in the early design phase of buildings: Strategies, tools, and future directions. *Buildings*, 15(10), 1612.
- Lang, L., Liu, Z., & Hu, B. (2021, February). Optimization decision of cooperative emission reduction of clothing supply chain based on carbon tax. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1790, No. 1, p. 012092). IOP Publishing.
- Le, K. T., Dang, T. K. L., Nguyen, T. T., & Vu, T. T. N. (2025). Research on Multi-Functional Fashion Contributes to Sustainable Development. *Engineering and Technology For Sustainable Development*, 35(5), 050-058.
- Leal Filho, W., Dinis, M. A. P., Liakh, O., Paço, A., Dennis, K., Shollo, F., & Sidsaph, H. (2024). Reducing the carbon footprint of the textile sector: an overview of impacts and solutions. *Textile Research Journal*, 94(15-16), 1798-1814.
- Liang, J., Dong, W., & Suh, S. (2025). Application of 3D digital technology in design practices within the circular fashion system: Implications for sustainability. *Textile Research Journal*, 00405175251339102.
- Liu, J., Liu, S., Zhu, L., Sun, L., Zhang, Y., Li, X., & Wang, L. (2023). Carbon neutrality potential of textile products made from plant-derived fibers. *Sustainability*, 15(9), 7070.
- Liu, Y., Zhao, H., & Li, X. (2024). Environmental policy effects of the carbon tax, subsidy, and policy combinations of China's textile industry: Evidence from the DSGE model. *Journal of Cleaner Production*, 439, 140791.
- Liu, Z. (2025). AI-Driven Dynamic Life Cycle Assessment and Modular Design Strategies for Sustainable Textiles: Enhancing Repairability, Upgradability, and End-of-Life Recovery. *Applied and Computational Engineering*, 12, 114-122.
- Maldini, I., Stappers, P. J., Gimeno-Martinez, J. C., & Daanen, H. A. (2019). Assessing the impact of design strategies on clothing lifetimes, usage and volumes: The case of product personalisation. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1414-1424.
- Marin, I. E., Bocancea, V., & Loghin, M. C. (2024). Developing a zero-waste pattern drafting method suitable for mass production. *Industria Textila*, 75(2), 171-176.

- Matuszak-Flejszman, A., Preisner, A., & Banach, J. K. (2024). Transport-Related Emissions and Transition Strategies for Sustainability—A Case Study of the Fast Fashion Industry. *Sustainability*, *16*(17), 7749.
- McKinney, E. (2024, January). Save the Fabric to Save the Planet: A Mass-Produced Zero-Waste Childrenswear Ensemble. In *International Textile and Apparel Association Annual Conference Proceedings* (Vol. 80, No. 1). Iowa State University Digital Press.
- Mesjar, L., Cross, K., Jiang, Y., & Steed, J. (2023). The intersection of fashion, immersive technology, and sustainability: a literature review. *Sustainability*, *15*(4), 3761.
- Mezatio, E. P., Aghelinejad, M., Amodeo, L., & Ferreira, I. (2023). A new mathematical model integrating the carbon tax and horizon planning to optimize the textile and clothing industry supply chain. *Journal of Cleaner Production*, *432*, 139849.
- Moazzem, S., Daver, F., Crossin, E., & Wang, L. (2018). Assessing environmental impact of textile supply chain using life cycle assessment methodology. *The journal of the Textile Institute*, *109*(12), 1574-1585.
- Mutambo, N., Peirson-Smith, A., KeChi-Okafor, C., Irving-Munro, A., Sheridan, K. J., Prendergast-Miller, M. T., ... & James, A. (2024). Mapping the environmental impact assessment landscape in the fashion and textile industries: Critical gaps and challenges. *Sustainability*, *16*(19), 8377.
- Nautiyal, M., Cleveland, D., Hunting, A., & Smith, A. (2025). Legacy datasets and their impacts: analysing Ecoinvent's influence on wool and polyester LCA outcomes. *Sustainability*, *17*(14), 6513.
- Ndagano, U. N., Cahill, L., Smullen, C., Gaughran, J., & Kelleher, S. M. (2025). The current state-of-the-art of the processes involved in the chemical recycling of textile waste. *Molecules*, *30*(2), 299.
- Nursari, F., Fadhilaturrehman, F., & Yuningsih, S. (2025). Potential application of the zero waste fashion method to optimize fabric usage. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *23*(1), 124-132.
- Olivar Aponte, N., Hernández Gómez, J., Torres Argüelles, V., & Smith, E. D. (2024). Fast fashion consumption and its environmental impact: a literature review. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, *20*(1), 2381871.
- Öztay, H. (2021). Değişen Tüketim Pratikleri Bağlamında Hızlı Moda. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, *8*(2), 468-481.
- Palomo-Lovinski, N. (2024). Missed opportunities: Fashion fabric sourcing professionals' use of the MSI in the Higg Index. *Fashion Practice*, *16*(3), 373-390.
- Pérez, L. A. E., Pérez, A. T. E., & Vásquez, Ó. C. (2022). Exploring an alternative to the Chilean textile waste: A carbon footprint assessment of a textile recycling process. *Science of the Total Environment*, *830*, 154542.

- Peters, G., Li, M., & Lenzen, M. (2021). The need to decelerate fast fashion in a hot climate-A global sustainability perspective on the garment industry. *Journal of cleaner production*, 295, 126390.
- Phan, K., Ügdüler, S., Harinck, L., Denolf, R., Roosen, M., O'Rourke, G., ... & De Meester, S. (2023). Analysing the potential of the selective dissolution of elastane from mixed fiber textile waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 191, 106903.
- Popowicz, M., Katzer, N. J., Kettele, M., Schoeggel, J. P., & Baumgartner, R. J. (2025). Digital technologies for life cycle assessment: a review and integrated combination framework. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 30(3), 405-428.
- Prado, V., Daystar, J., Wallace, M., Pires, S., & Laurin, L. (2021). Evaluating alternative environmental decision support matrices for future Higg MSI scenarios. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(7), 1357-1373.
- Psarommatis, F., & May, G. (2024). Digital product passport: A pathway to circularity and sustainability in modern manufacturing. *Sustainability*, 16(1), 396.
- R. Kumara, A., Priyantha K. Epa, U., & S. Ranundeniya, N. (2026, February). The Environmental Impacts of Cotton and Polyester Fabrics Manufacturing in Sri Lanka: A Lifecycle Approach. In *Macromolecular Symposia* (Vol. 415, No. 1, p. e70216).
- Ramkalaon, S., & Sayem, A. S. M. (2021). Zero-Waste Pattern Cutting (ZWPC) to tackle over sixty billion square metres of fabric wastage during mass production of apparel. *The Journal of The Textile Institute*, 112(5), 809-819.
- Ramzan, M. B., Habib, M. S., Omair, M., Naeem, J., Mustafa, H., Iqbal, M. W., & Malik, A. I. (2023). Role of design for disassembly in educating consumers for circular behavior. *Sustainability*, 15(21), 15505.
- Ribul, M., Lanot, A., Pisapia, C. T., Purnell, P., McQueen-Mason, S. J., & Baurley, S. (2021). Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129325.
- Roberts, J., & Bailey, S. (2025). Threading the Future: AI, 3D Technology, and Human Skills in the Evolving Fashion Workforce. *AHFE International*, 142, 65-74.
- Rossi, M., Papetti, A., Marconi, M., & Germani, M. (2021). Life cycle assessment of a leather shoe supply chain. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(4), 686-703.
- Sahimaa, O., Miller, E. M., Halme, M., Niinimäki, K., Tanner, H., Mäkelä, M., ... & Hummel, M. (2024). From simplistic to systemic sustainability in the textile and fashion industry. *Circular Economy and Sustainability*, 4(2), 1115-1131.

- Sandin, G., Lidfeldt, M., & Nellström, M. (2025). Exploring the Environmental Impact of Textile Recycling in Europe: A Consequential Life Cycle Assessment. *Sustainability*, 17(5), 1931.
- Santos, R., & Abreu, M. J. (2025). Impact assessment and product life cycle analysis of different jersey fabrics using conventional, post-industrial, and post-consumer recycled cotton fibers. *Sustainability*, 17(13), 5700.
- Sanyé-Mengual, E., & Sala, S. (2022). Life Cycle Assessment support to environmental ambitions of EU policies and the Sustainable Development Goals. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18(5), 1221-1232.
- Satinet, C., & Fouss, F. (2022). A supervised machine learning classification framework for clothing products' sustainability. *Sustainability*, 14(3), 1334.
- Sayem, A. S. M. (2022). Digital fashion innovations for the real world and metaverse. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 15(2), 139-141.
- Seifali Abbas-Abadi, M., Tomme, B., Goshayeshi, B., Mynko, O., Wang, Y., Roy, S., ... & Van Geem, K. M. (2025). Advancing textile waste recycling: Challenges and opportunities across polymer and non-polymer fiber types. *Polymers*, 17(5), 628.
- Semba, T., Sakai, Y., Ishikawa, M., & Inaba, A. (2020). Greenhouse gas emission reductions by reusing and recycling used clothing in Japan. *Sustainability*, 12(19), 8214.
- Senese, A., Filippelli, E., Barbagallo, B., Petrosillo, E., & Diolaiuti, G. A. (2025). Fast Fashion Footprint: An Online Tool to Measure Environmental Impact and Raise Consumer Awareness. *Geographies*, 5(3), 44.
- Soares, R. R. (2023). *Thermoplastic Textile Fibers: Perspectives on Environmental Impacts and Innovations in Production and Recycling* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Sohn, J., Nielsen, K. S., Birkved, M., Joanes, T., & Gwozdz, W. (2021). The environmental impacts of clothing: Evidence from United States and three European countries. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 2153-2164.
- Stadler, E., Bonatti, M., & Mithöfer, D. (2025). Unraveling Complex Impacts Pathways of the Ecodesign for Sustainable Products Regulation and Corporate Sustainability Due Diligence Directive in Global Textile Value Chains: A European Perspective. *Regulation & Governance*.
- Stefańska, M. (2021). Product life-cycle-problems of product planned obsolescence and fast fashion. In *Sustainability and sustainable development* (pp. 199-208). Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu.

- Steubing, B., de Koning, A., Merciai, S., & Tukker, A. (2022). How do carbon footprints from LCA and EEIOA databases compare? A comparison of ecoinvent and EXIOBASE. *Journal of Industrial Ecology*, 26(4), 1406-1422.
- Stridsland, T., Bjørnstad, W., Vigen, K., Østergaard, K. L., & Sanderson, H. (2023). No-one left behind: An open access approach to estimating the carbon footprint of a Danish clothing company. *Journal of Cleaner Production*, 426, 139126.
- Sumter, D., de Koning, J., Bakker, C., & Balkenende, R. (2020). Circular economy competencies for design. *Sustainability*, 12(4), 1561.
- Vrendenburg, C. J. (2025). Durable design: what role for EU Design Law in the green transition?. *GRUR International*, 74(6), 525-531.
- Wang, S., & Salmon, S. (2022). Progress toward circularity of polyester and cotton textiles. *Sustainable Chemistry*, 3(3), 376-403.
- Wiedemann, S. G., Biggs, L., Nguyen, Q. V., Clarke, S. J., Laitala, K., & Klepp, I. G. (2021). Reducing environmental impacts from garments through best practice garment use and care, using the example of a Merino wool sweater. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(6), 1188-1197.
- Wiedemann, S. G., Clarke, S. J., Nguyen, Q. V., Cheah, Z. X., & Simmons, A. T. (2023). Strategies to reduce environmental impacts from textiles: Extending clothing wear life compared to fibre displacement assessed using consequential LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107119.
- Wiegand, T., & Wynn, M. (2023). Sustainability, the circular economy and digitalisation in the German textile and clothing industry. *Sustainability*, 15(11), 9111.
- Xia, T., Benkirane, R., & Perwuelz, A. (2025). Optimizing Laundry for Sustainability: Balancing Washing Efficiency and Environmental Impact in the Clothing Use Phase. *Sustainability*, 17(18), 8411.
- Younus, M., Hossen, S., & Islam, M. M. (2024). Advanced Business Analytics In Textile & Fashion Industries: Driving Innovation And Sustainable Growth. *Science*, 1(2), 37.
- Yuan, Y., Yan, L., Liang, S., Li, Y., Qu, H., Ding, X., & Wang, J. (2023). The carbon footprint of household clothing washing in Shanghai during winter and spring based on empirical data. *Textile Research Journal*, 93(9-10), 1938-1947.
- Zamani, B., Svanström, M., Peters, G., & Rydberg, T. (2015). A carbon footprint of textile recycling: A case study in Sweden. *Journal of industrial ecology*, 19(4), 676-687.
- Zhang, A., & Seuring, S. (2024). Digital product passport for sustainable and circular supply chain management: a structured review of use cases. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 27(12), 2513-2540.

- Zhu, S., & Liu, X. (2025). The Ecodesign Transformation of Smart Clothing: Towards a Systemic and Coupled Social–Ecological–Technological System Perspective. *Sustainability*, 17(5), 2102.
- Zuin, S., Dengin, V., Perzolla, V., Bisaro, E., Pipita, M. M., Azzano, A., ... & Stabon, E. (2025, June). The Laundry Care LCA project. In *Proceedings of the 6th Product Lifetimes and the Environment Conference (PLATE2025)* (No. 6).

