T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE ÜRÜN ÇEVRESEL AYAK İZİ DEĞERLENDİRMESİ: HAMMADDE KULLANIMININ ÇEVRESEL ETKİLERİNİN ANALİZİ

Elif Ayça ÇAKAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Güleda ENGİN

Temmuz, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE ÜRÜN ÇEVRESEL AYAK İZİ DEĞERLENDİRMESİ: HAMMADDE KULLANIMININ ÇEVRESEL ETKİLERİNİN ANALİZİ

Elif Ayça ÇAKAR tarafından hazırlanan tez çalışması 11.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Güleda ENGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Güleda ENGİN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ebru KOCA AKKAYA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Mehmet Salim ÖNCEL, Üye
Gebze Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Güleda ENGİN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Tekstil Endüstrisinde Ürün Çevresel Ayak İzi Değerlendirmesi: Hammadde Kullanımının Çevresel Etkilerinin Analizi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Elif Ayça ÇAKAR

İmza

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanma sürecinde akademik rehberliği, bilgi birikimi ve değerli yönlendirmeleriyle bana yol gösteren, her zaman anlayışla yaklaşarak destek olan çok kıymetli danışmanım Prof. Dr. Güleda Engin'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Süreç boyunca gösterdiği anaç tavrı, güven veren yaklaşımı ve destekleyici tutumu ile benim için örnek bir akademisyen ve rehber olmuştur. Tez sürecindeki her aşamada yapıcı geri bildirimleri ve teşvik edici yaklaşımı, bu çalışmanın şekillenmesinde büyük rol oynamıştır.

Hayatım boyunca bana koşulsuz destek veren, her zaman yanımda olduklarını hissettiren ve bu süreci güçlü bir şekilde tamamlamamda en büyük paya sahip olan sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim. Onların sabrı, anlayışı, manevi desteği ve sevgisi olmasaydı bu çalışmayı tamamlamak çok daha güç olurdu. Eğitim hayatım boyunca bana sundukları imkânlar ve her daim gösterdikleri inanç sayesinde bugün bu noktaya ulaşabildim.

Bu zorlu süreçte yanımda olan herkese, özellikle danışman hocam ve aileme, tüm kalbimle minnettarım.

Elif Ayça ÇAKAR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 GİRİŞ 1

1.1 Giriş 1

2 TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE ÜRETİM SÜREÇLERİ 4

2.1 Tekstil Üretim Süreçlerinde Temel Yaklaşımlar ve Genel Bakış 8

2.1.1 Hammadde İşleme Süreçleri 9

2.1.2 Üretim Teknikleri ve Çevresel Etkileri 11

2.2 Tekstil Üretim Süreçlerinde Enerji ve Su Tüketiminin Çevresel Boyutları ... 13

2.2.1 Hammadde Kullanımı 14

2.2.2 Enerji Tüketimi 18

2.2.3 Su Tüketimi 20

2.2.4 Atıksu Yönetimi ve Kirleticiler 21

2.2.5 Arazi Kullanımı 23

2.3 Geleneksel Metotların Değerlendirilmesi 25

2.4 Modern Metotların Değerlendirilmesi 26

3 TEKSTİL ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAMMADDE TÜRLERİ 30

3.1 Pamuk 31

3.1.1 Konvansiyonel Pamuk 32

3.1.2 Organik Pamuk 33

3.1.3 Genetiği Değiştirilmiş Pamuk (Bt-Cotton) 36

3.1.4 Geri Dönüştürülmüş Pamuk 37

3.2 Viskon ve Selüloz Tabanlı Lifler 38

3.2.1 Viskon (Rayon) 39

3.2.2 Lyocell ve Tencel 40

3.2.3 Bambu Elyafı 40

3.2.4 Modal 41

3.3 Kenevir ve Keten 42

3.3.1 Kenevir 42

3.3.2 Keten 43

3.3.3 Muz Lifi 44

3.4 Polyester 45

3.4.1 Konvansiyonel Polyester 47

3.4.2 Geri Dönüştürülmüş Polyester (rPET) 48

3.4.3 Biyobozunur Polyester 49

3.5 Naylon 50

3.5.1 Geri Dönüştürülmüş Naylon 51

3.5.2 Biyobozunur Naylon 51

4 HAMMADDE TERCİHLERİNİN ÇEVRESEL AYAK İZİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ 53

4.1 Yaşam Döngüsü Analizi ve Ürün Çevresel Ayak İzi 54

4.2 Değerlendirmeye Alınan Hammaddelerin Çevresel Etkileri 63

4.2.1 Pamuk 65
4.2.2 Bambu 68
4.2.3 Polyester 70
4.3 Çevresel Etkilerin İncelenmesi ve Karşılaştırılması 72
5 SONUÇ **77**
5.1 Genel Değerlendirme 77
5.2 Öneriler 79
KAYNAKÇA **80**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **94**

SİMGE LİSTESİ

N	Azot
NO_x	Azot oksitler
PO_4^{3-}	Fosfat iyonu
P	Fosfor
CS_2	Karbon disülfür
CO_2	Karbondioksit
kJ/kg	Kilojoule / kilogram
kWh	Kilowatt-saat
kWh/kg	Kilowatt-saat / kilogram
SO_2	Kükürt dioksit
MJ	Megajoule
MJ/kg	Megajoule / kilogram
CH_4	Metan
MMT	Milyon metrik ton
NaOH	Sodyum hidroksit

KISALTMA LİSTESİ

AB	Abaka
AI	Yapay Zeka
ALG	Aljinat
AP	Asidifikasyon Potansiyeli
AR	Aramid
AS	Asbest
AU	Altın Elyaf
BAM	Bambu
BAN	Muz
BHET	Bishidroksi Etil Tereftalat
BOD	Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
CA	Asetat
CBAM	Bambu Rayonu
CC	Koko
CEF	Seramik Elyaf
CF	Karbon Elyafı
CLF	Klorlifi
CLY	Liyosel
CMD	Modal
CO	Pamuk
CPS	Siber-Fiziksel Sistemler
CRN	Mısır Elyafı
CTA	Triasetat
CUP	Kupro
CV	Viskoz
ED	Elastodiyen
EEC	Avrupa Ekonomik Topluluğu

EL	Elastan
EME	Elastomultiester
EP	Ötrofikasyon Potansiyeli
FAOSTAT	Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü İstatistik Veritabanı
GF	Cam Elyafı
GOTS	Küresel Organik Tekstil Standardı
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli
HA	Kenevir
IFOAM	Uluslararası Organik Tarım Hareketleri Federasyonu
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
JU	Jüt
KP	Kapok
LCA	Yaşam Döngüsü Analizi
LCSA	Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi
LI	Keten
loT	Nesnelerin İnterneti
loT	Nesnelerin İnterneti
MAC	Modakrilik
MTF	Metal Elyaf
NMMO	N-Metilmorfolin-N-Oksit
NOP	Ulusal Organik Programı
OCS	Organik İçerik Standardı
PA	Polyamid
PAN	Akrilik
PE	Polietilen
PEF	Ürün Çevresel Ayak İzi
PEFCR	Ürün Çevresel Ayak İzi Kategori Kuralları
PES	Polyester
PET	Polietilen Tereftalat
PM	Partikül Madde
PNY	Yerfıstığı Elyafı
PO	Poliolefin
PP	Polipropilen
PTFE	Flor Lifleri

PU	Poliüretan
RA	Rami
rPET	Geri Dönüştürülmüş Polyester
RUB	Kauçuk
SE	İpek
SI	Sisal
SPF	Soya Fasulyesi Elyafı
TOC	Toplam Organik Karbon
TPA	Tereftalik Asit
TWP	Tekstil Islak İşleme
UV	Ultraviyole
WG	Vikunya
WK:	Devetüyü
WL	Lama
WM	Tiftik
WN	Ankara Tavşanı
WO	Yün
WP	Alpaka
WS	Kaşmir
WU	Su Kullanımı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Değer zinciri analizi **6**
Şekil 2.2 Tekstil endüstrisinde emisyon ve çevresel etkiler **8**
Şekil 2.3 Tekstil endüstrisinin üretim aşamalarında kullanılan kaynaklar ve enerji türleri **18**
Şekil 2.4 Pamuklu kumaş yaşam döngüsü basamakları ve su kullanım noktaları **20**
Şekil 3.1 Bambu lifi **41**
Şekil 3.2 Muz lifi **45**
Şekil 4.1 Yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) çerçevesi **57**
Şekil 4.2 Mavi, yeşil ve gri su ayak izi tanımları **61**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Liflerin İngilizce-Türkçe karşılıkları ve kısaltmaları **15**
Tablo 2.2 Dünyada ve Türkiye'de pamuk üretimi için yıllara göre ekili alanlar **24**
Tablo 2.3 Türkiye'de yıllara göre liflik keten üretimi için ekilen alan **24**
Tablo 4.1 Ürün çevresel ayak izinin 16 etki kategorisi **58**
Tablo 4.2 Pamuk, bambu ve polyester için çevresel etki göstergelerinin karşılaştırılması **73**

ÖZET

Tekstil Endüstrisinde Ürün Çevresel Ayak İzi Değerlendirmesi: Hammadde Kullanımının Çevresel Etkilerinin Analizi

Elif Ayça ÇAKAR
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Güleda ENGİN

Günümüzde tekstil endüstrisi, küresel ölçekte hem yüksek hammadde ve enerji tüketimi hem de üretim süreçlerinden kaynaklanan emisyonlar nedeniyle ciddi çevresel etkilere sahip sektörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, tekstil ürünlerinin çevresel etkilerinde hammadde seçiminin belirleyici rolü vurgulanmıştır. Tekstil üretiminde kullanılan hammadde türlerinin karşılaştırması yapılarak pamuk, bambu ve polyester detaylı incelemeye alınmış ve ürün çevresel ayak izi yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Karşılaştırma, her bir lif türünün üretim aşamalarındaki su tüketimi, enerji ihtiyacı, sera gazı emisyonları, arazi kullanımı, biyolojik parçalanabilirlik, mikroplastik salımı ve geri dönüştürülebilirlik gibi başlıca çevresel göstergeler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Özellikle farklı hammadde türlerinin sürdürülebilirlik açısından taşıdığı potansiyellerin ortaya konması ile sektörün çevre dostu dönüşümüne katkı sağlayacak bir analiz sunulmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda, pamuk lifinin doğada çözünebilirliği ve düşük mikroplastik salımı gibi çevresel avantajları olmasına rağmen, arazi kullanımı ve su tüketimi açısından polyester lifine kıyasla daha yüksek çevresel etkilere sahip

olduğu görülmüştür. Polyester ise yüksek dayanıklılık, düşük üretim maliyeti ve işlem verimliliği nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak fosil yakıta bağlılığı ve kullanım aşamasında mikroplastik sorunu göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Bununla birlikte, bambu lifi, düşük kimyasal ve su ihtiyacı, hızlı yenilenebilirlik kapasitesi ve çevresel ayak izinin daha düşük olması ile günümüzde sürdürülebilir bir alternatif olarak daha fazla öne çıkmaktadır. Dolayısıyla, bambu lifinin tekstil üretiminde daha yaygın kullanılması, çevresel etkilerin en aza indirilmesine yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çevresel etki, ürün çevresel ayak izi, hammadde seçimi, sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

Product Environmental Footprint Assessment in Textile Industry: Analysing the Environmental Impacts of Raw Material Use

Elif Ayça ÇAKAR
Department of Environmental Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Güleda ENGİN

In today's world, the textile industry stands out as one of the sectors with significant environmental impacts due to its intensive consumption of raw materials and energy, as well as emissions arising from production processes. This study emphasizes the critical role of raw material selection in determining the environmental impacts of textile products. By comparing different raw material types used in textile production, cotton, bamboo, and polyester fibers were examined in detail and assessed using the Product Environmental Footprint (PEF) methodology. The comparison was carried out based on key environmental indicators including water consumption, energy demand, greenhouse gas emissions, land use, biodegradability, microplastic release, and recyclability throughout each fiber's production process. The study offers a comprehensive analysis aimed at supporting the sustainable transformation of the sector by highlighting the sustainability potential of different raw material types.

The results indicate that, despite the environmental advantages of cotton such as biodegradability and low microplastic release, it has a higher environmental impact in terms of land use and water consumption compared to polyester. Polyester, on the other hand, is widely preferred in the industry due to its durability, low production cost, and process efficiency. However, its dependency on fossil fuels and the issue of microplastic pollution during use cannot be overlooked. Bamboo fiber emerges as a more sustainable alternative today, thanks to its low requirement for chemicals and water, rapid renewability, and relatively lower environmental footprint. Therefore, the wider adoption of bamboo fiber in textile production is considered a significant step toward minimizing environmental impacts.

Keywords: Environmental impact, product environmental footprint, raw material selection, sustainability.

1
GİRİŞ

1.1 Giriş

Tekstil sektörü, birçok ülkenin ekonomisine önemli katkı sağlamakta olan hem büyük hem de küçük ölçekli faaliyetleri kapsayan bir endüstri dalıdır. Üretimdeki hacmi ve istihdamı değerlendirildiğinde, tekstil sektörü dünya genelinde en büyük sektörlerden biridir. Tekstil ve hazır giyim sektörleri, hammadde temini ile başlayıp nihai ürünün elde edilmesine kadar uzanan birçok aşamaya sahip bir üretim zinciridir. Bu süreç, tekstil elyaflarının hazırlanması ve üretilmesi, iplik ve kumaş üretimi, çeşitli apre işlemleri (örneğin baskı, ağartma, kaplama ve boyama) ve son olarak tekstil ürünlerinin moda veya standart ürünlere dönüştürülmesi gibi aşamaları içermektedir. Kullanılan hammaddeler doğal ve üretilmiş olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğal elyaflar arasında pamuk, ipek, yün, bambu, keten ve kenevir gibi kaynaklar yer alırken; üretilmiş elyaflar doğal polimerlerin dönüşümünden elde edilen selülozik lifleri (modal, viskoz, lyocell gibi), sentetik polimerlerden türetilen petrol bazlı lifleri (polyester, naylon, polipropilen gibi) kapsamaktadır. Tekstil üretimi, su, çeşitli kimyasallar ve yakıt gibi kaynakların yoğun kullanıldığı çok aşamalı ve uzun bir süreç olup, aynı zamanda büyük miktarda atık üretmektedir [1].

2023 yılında 124 milyon metrik ton (MMT) ile rekor seviyeye ulaşan global tekstil lif üretimi, 2000 yılı üretiminin yaklaşık iki katına ulaşmıştır [2]. Mevcut iş modellerinin devam etmesi halinde 2030 yılına kadar 160 MMT'a ulaşan üretim öngörülmektedir. Tekstil ve lif üretiminde su ve kimyasal tüketimi ile önemli miktarda kaynak tüketimi mevcuttur. Özellikle süreç verimliliğinin düşük olduğu uygulamalar, kaynak israfına ve çevresel bozulmaya neden olmaktadır.

Sera gazları ve atıkların oluşumuna yol açılmasıyla ciddi çevresel problemler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca hızla değişen trendler, hızlı moda iş modelleri, gelişen teknolojiler ve düşük fiyatlardan satılan ürünler ile tetiklenen tekstil ve lif üretimi, yüksek miktarda atık oluşumuna sebep olmaktadır [3].

Tekstil ürünlerinin çevresel performansını belirleyen en temel unsurlardan biri, üretimde kullanılan lifin türüdür. Liflerin üretim kaynakları, işlenmesinde kullanılan yöntemleri, kullanım ömrü ve bertaraf süreçleri, enerji ve su tüketiminden başlayıp sera gazı emisyonlarına, kimyasal kullanımından atık yönetimine kadar birçok çevresel etkiyi doğrudan şekillendirmektedir. Bu bağlamda, doğal ve yarı sentetik kaynaklı liflerle (pamuk, bambu, selülozik lifler) fosil yakıt bazlı sentetik liflerin (polyester, naylon) çevresel etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, sürdürülebilir tekstil üretimi için kritik bir gereklilik haline gelmiştir [4].

Geleneksel pamuk tarımı, dünya tarım alanlarının %2,4'ünde yapılmakta olup pestisit kullanımının %11'ini oluşturmakta ve çevresel toksisiteyi artırmaktadır. Pamuk üretiminin %53'lük kısmı yoğun sulama gerektirdiğinden verimsiz sulama yöntemleri ile birleştirildiğinde toprakta verimsizlik ve su israfı oluşmaktadır. Organik tarımın yaygınlaştırma çabaları, geleneksel metotların ciddi çevresel problemlere sebep olmasıdır. Bununla birlikte geleneksel pamuk üretiminin yapıldığı bölgelerde yağışların az olmasıyla yoğun sulama yapılmakta ancak bu sayede daha fazla verim alınmaktadır. Çok sayıda yüksek enerji ihtiyacı gerektiren pamuk üretiminde, pamuk işleme genellikle makineleşmiş olsa da elle hasat hala devam etmektedir. Geliştirilen teknolojik aletler ile de hasattaki atıklar hala tarlada bırakılmaktadır. Bu nedenler dikkate alındığında, çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik alternatifler hala önemlidir. Pamuk, tekstil sektörü pazarında halihazırda gelişmeye açık bir hammaddedir. Organik pamuk üretimiyle de pazara çevre dostu alternatifler giriş yapmakta ve büyümektedir [5]. Bu bağlamda, tekstil sektörünün sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla alternatif doğal liflerin kullanımı önem kazanmaktadır. Pamuk yerine geri dönüştürülmüş ya da orman temelli, rejeneratif selülozik elyaflara geçilerek su tüketimi azaltılabilmektedir. Keten ve kenevir gibi doğal lifler, daha ılıman iklim koşullarında yetiştirilebilmekte ve yüksek verim için düşük girdi gerektirmektedir. Bu lifler ile kumaşlarda nefes alabilirlik ve ısı yalıtımı gibi önemli özellikler sağlanmaktadır. Keten ve kenevirin tarımı ve liflerinin

kullanımı çok eski zamanlara dayanmakta ve pamuk lehine yaşanan tercih nedeniyle bu liflerin önemi son yüzyıllarda azalmıştır [6]. Ayrıca tekstil üretim süreçlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapılması da iklim değişikliği etkisini azaltmak için uygulanabilir bir çözüm olabilmektedir. Bambu, çok yönlü kullanım alanları ve karbon tutma kapasitesi sayesinde iklim değişikliğini azaltmaya yönelik umut verici bir çözüm olarak değerlendirilmektedir [7]. Hızlı büyümekte olan yenilenebilir bir kaynaktır. Ucuz olması ve yaygın olarak bulunabilen bir malzeme olarak ekolojik ve sosyal faydalar sağlama açısından benzersiz özelliklere ve avantajlara sahiptir [8]. Viskon, modal ve lyocell gibi selüloz bazlı lifler, yenilenebilir ağaç kaynaklarından elde edilmektedir. Biyolojik olarak parçalanabilir olmaları ile sentetik liflere çevre açısından tercih edilebilir bir alternatif sunmaktadır [4]. Geleneksel viskon ile kıyaslandığında lyocell selülozik lifi, yeniden kullanılan ve büyük ölçüde geri kazanılan kapalı devre sistemlerinde üretilmekte olup, çevre kirliliğin azaltılmasında yardımcı olmaktadır [9]. Düşük çevresel toksisiteleri ve biyobozunur yapıları sebebiyle selüloz bazlı lifler, döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu sürdürülebilir tekstil malzemeleri olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir. Doğal ve selülozik tabanlı liflerin çevresel avantajları olmasına rağmen, günümüzde polyester ve naylon gibi sentetik lifler küresel tekstil üretiminde baskın konuma gelmiştir. Ancak, polyester ve naylon gibi sentetik lifler, fosil yakıtlardan türetilmekte olup, üretimleri sırasında sera gazı salınımı ve yüksek enerji tüketimi ile ciddi çevresel etkiler oluşturmaktadır [4]. Sentetik lifler, özellikle polyester, yıkama sırasında mikroplastik parçacıkları yaymaktadır. Bu da sucul yaşamı tehdit etmekte ve besin zincirine girerek insan sağlığına kadar ulaşan çevresel riskler doğurmaktadır [10].

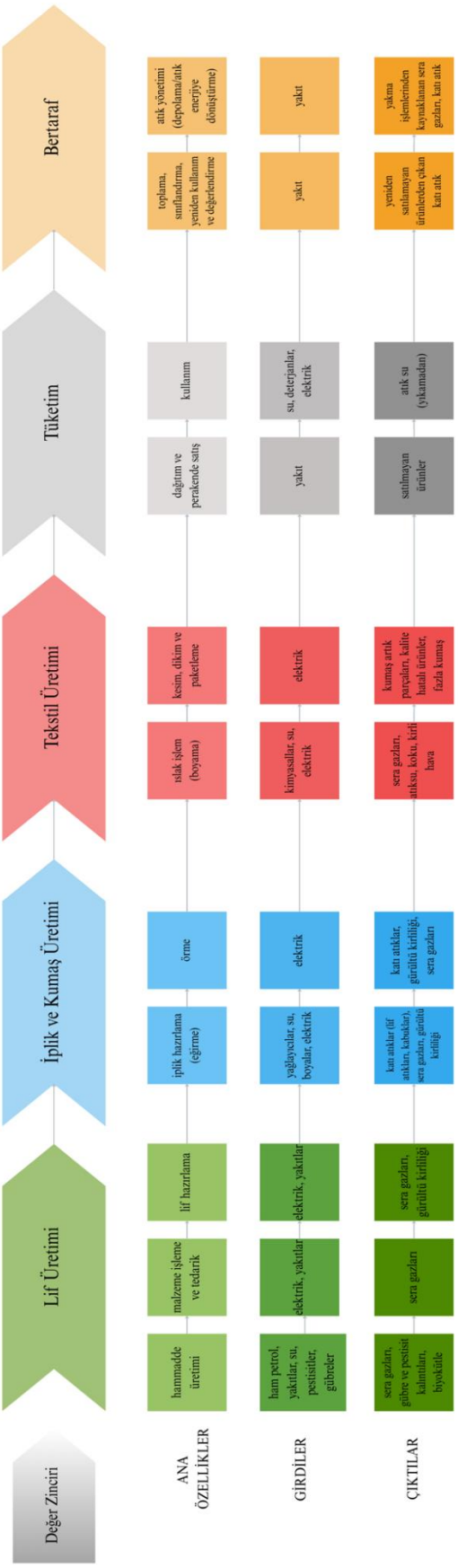
Sonuç olarak, tekstil ürünlerinin çevresel sürdürülebilirliğinde lif seçimi temel bir belirleyici olup, doğal ve selülozik tabanlı lifler (örneğin pamuk, bambu, viskon, lyocell) biyobozunurluk ve yenilenebilirlik açısından önemli avantajlar sunarken, sentetik lifler (özellikle polyester ve naylon) üretim verimliliği, maliyet ve kullanım ömrü bakımından öne çıkmakla birlikte yüksek çevresel yük potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, çevresel etkiyi en aza indirmek için lif türü seçiminde yaşam döngüsü boyunca oluşan etkiler dikkate alınmalı ve sürdürülebilir üretim yaklaşımlarıyla desteklenmelidir [10].

2
TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE ÜRETİM SÜREÇLERİ

Tekstil sektörü, dünyadaki en geniş çaplı ve en fazla kaynak tüketen endüstrilerden biridir. Giyim, ev tekstili ve teknik tekstiller gibi çeşitli alanlarda kullanılan tekstil ürünlerinin üretim süreci; hammadde temini, iplik üretimi, kumaş oluşturma, boyama, bitim işlemleri ve konfeksiyon gibi aşamalardan oluşturmaktadır. Bu süreçlerin her biri belirli bir miktarda su, enerji ve kimyasal kullanımını gerektirmektedir. Tekstil endüstrisi, hammadde üretiminden bitmiş ürünlerin dağıtımına kadar tam entegre bir yapı sergileyerek her aşamada katma değer sağlayan bir sektördür. Ancak, sektörün her adımında bazı olumsuz çevresel problemler doğmaktadır. Kumaşların ıslak işleme süreçlerinde kimyasal, su ve yakıt kullanımı artış göstermektedir. Bu aşamanın yüksek su tüketimine ve makine operasyonları için yüksek elektrik tüketimine sahip olması ile çevreyi olumsuz etkilemektedir. Yaş işlem sırasında, haşıl sökme (desizing) işlemi, yüksek Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ) seviyelerine sahip atıksuların yaklaşık yarısı üretilmektedir. Ağartma sürecinde, yüksek oranda toksik klorlu organik yan ürünlerin oluşması en büyük sorundur. Boyama işlemi sırasında tuzlar, ağır metaller, yüzey aktif maddeler, sülfit ve formaldehit gibi birçok kimyasal eklenmekte; bu maddeler, arıtılmadan alıcı ortama salındığında çevre kirliliğine taban oluşturabilmektedir. Tekstil atıksuları, uygun şekilde arıtılmadığında hem çevreyi hem de insan sağlığını tehlikeye atmaktadır [11]. Tüketim aşamasına geçildiğinde elektrik, su ve deterjan kullanımı artmaktadır. Kullanım ömrünün sonuna gelindiğinde su kirliliği ve sera gazı emisyonları ile çevresel problemler ortaya çıkmaktadır.

Tekstil değer zinciri boyunca çevresel etkileri belirlenerek Şekil 2.1 oluşturulmuştur. Buradan, en büyük etkinin hammadde üretimi aşamasında olduğu anlaşılmaktadır. Bu aşamada büyük miktarda su, yakıt, pestisit ve gübre kullanımı söz konusudur. Birçok fabrika, eski ve verimsiz makineleri kullanmaya devam ettiğinden enerji tüketimi de fazladır. Sadece enerji tüketimi ile kalmayıp, toz ve gürültü oluşturan ekipmanlar, çalışanların sağlığını riske atmakta, eksik kişisel koruyucu ekipmanı kullanımı aksatılarak iş güvenliğini olumsuz etkilemektedir. Bunların sonucunda düşük verimlilik ortaya çıkmakta olup daha fazla atık oluşmaktadır. İş yeri güvenliğinin sağlanması, makinelerin daha teknolojik ve modern olması ile genel verimlilik artırılabilmektedir. Atık yönetiminin yetersiz olması, ürünlerin geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçlerinden geçmeden direkt çöplüklere gitmesi önemli çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Endüstriyel atıkların yönetiminde, markasız tekstil atıkları geri dönüşüm firmalarına satılmakta, markalı reddedilmiş giysiler marka bütünlüğünü korumak amacıyla parçalanarak çimento fırınlarında yakıt olarak kullanılmaktadır.

Şekil 2.1, üretim sürecinin çeşitli yaşam döngüsü aşamaları boyunca gerçekleştirilen değer zinciri analizi göstermektedir [12].

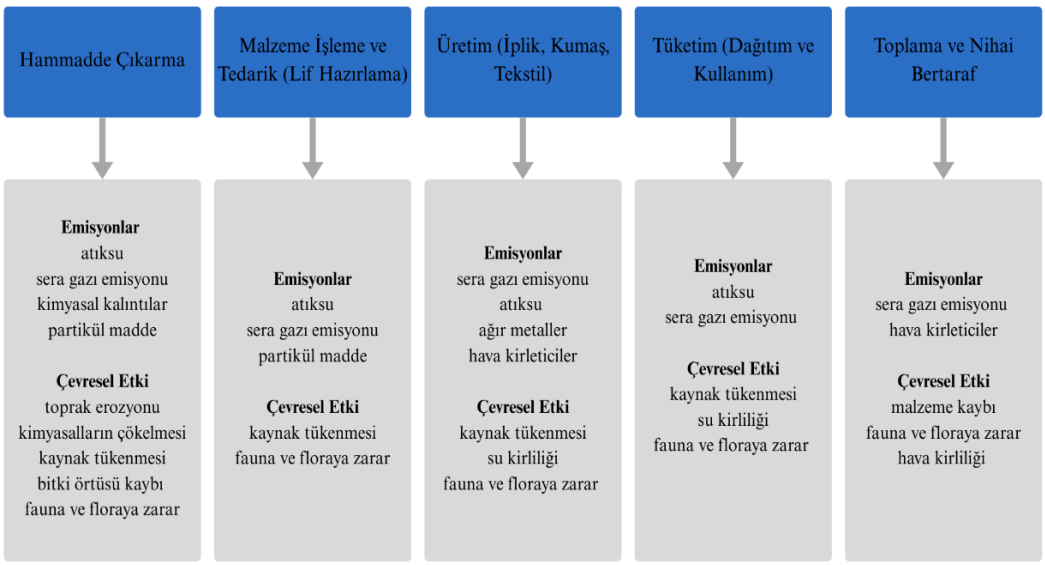


Şekil 2.1 Değer zinciri analizi [12]

Tekstil ve giyim endüstrisi şu süreçleri içermektedir:

- Hammaddenin temini ve işlenmesi: Hammaddeden liflerin hazırlanması ve üretilmesi. “Doğal” lifler pamuk, ipek, yün, keten ve keneviri içerirken; “üretim lifleri” doğal polimerlerin dönüşümünden (selülozik lifler: viskon, Lyocell, modal) veya sentetik polimerlerden (organik maddelerden elde edilen lifler: naylon, polyester, akrilik, polipropilen) ve inorganik malzemelerden (cam lifleri gibi) üretilen lifleri içermektedir.
- İplik ve kumaş üretimi
- Bitim işlemleri: Tekstillere tüketicilerin talep ettiği görsel ve estetik özellikleri kazandırmak amacıyla yapılan baskı, ağartma, boyama ve kaplama işlemlerini içermektedir.
- Tekstillerin giysiye dönüştürülmesi: Moda veya moda dışı giysi üretimi olarak bilinmektedir.

Tekstil üretim süreci; yakıt, su ve çeşitli kimyasalların yüksek miktarda tüketildiği, uzun ve çeşitli işlemlere sahip ve önemli miktarda atık oluşturan süreçtir. Düşük proses verimliliği uygulamaları yaygın olup, bu durum kaynak israfına ve çevrenin ciddi şekilde zarar görmesine yol açmaktadır. Şekil 2.2’de sunulan görsel, yaşam döngüsünün her bir aşamasıyla ilişkili emisyonları ve çevresel etkileri belirlemek ve değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Tekstil endüstrisinde yaygın çevresel sorunlar genellikle arıtılmamış atıksuların deşarj edilmesiyle su kaynaklarının kirlenmesiyle ilişkilendirilir. Aynı zamanda, hava emisyonları, aşırı gürültü ve kötü kokular gibi diğer çevresel sorunlar da eşit derecede önemli etkenlerdir [13].



Şekil 2.2 Tekstil endüstrisinde emisyon ve çevresel etkiler [12]

2.1 Tekstil Üretim Süreçlerinde Temel Yaklaşımlar ve Genel Bakış

Tekstil üretimi, karmaşık ve geniş bir yapıya sahiptir ve bu zincirin tamamını kapsayan sürdürülebilir uygulamaları hayata geçirmek büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Bu zincir, hammadde çıkarma aşamasıyla — yani beşik aşamasıyla — başlamaktadır. Üretim, dağıtım ve kullanım gibi aşamalar geçildikten sonra bertaraf (mezar) aşamasında sona ermektedir. Hammadde çıkarma sonrası, tekstil zincirindeki ilk işlem lif üretimidir. Bu aşamayı önce iplik üretimi ardından kumaş üretimi takip etmekte ve süreç, giyim üretimiyle tamamlanmaktadır. Bu aşamada, bitmiş ürün, dağıtım ve perakende kanalları aracılığıyla müşteriye sevk edilmeye hazır hale gelmektedir. Son aşama, ürünün kullanılması, kullanımın ömrünü tamamlaması ve bertaraf edilmesi sürecidir. Bu aşama tüketiciler tarafından kontrol edilmektedir. Tüketici davranışları, küresel çevresel etkiler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve sürdürülebilirlik çabalarının başarısını büyük ölçüde etkileyebilmektedir [14].

Tekstil üretiminde temel yaklaşımlar, hammadde işleme süreçleri ve üretim teknikleri olarak iki ana dalda değerlendirilebilmektedir. Bu iki ana dalın birbirine bağlı dinamikleri, tekstil ürünlerinin çevresel ayak izini büyük ölçüde şekillendirmektedir.

2.1.1 Hammadde İşleme Süreçleri

Tekstil üretimi, hammadde tedariki ile başlayan ve son ürünün tüketiciye kadar ulaşmasını içeren bir süreçtir. Karmaşık ve çok aşamalı olan bu süreçlerin kapsamı, kullanılan hammadde türlerine, üretimin modern veya geleneksel seviyede oluşuna ve ekosisteme verdiği zararları minimize etmeye yönelik yeniliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Tüm tekstil lifleri genellikle benzer şekillerde işlenmektedir: ham lifler üretilir, toplanır ve iplikhanelerde eğrilmeye hazır hale getirilir. Üretilen iplik, dokuma veya örme bir kumaşa dönüşmeden önce başka ön işlem süreçlerinden geçebilmektedir. Bu aşama sonrası kumaşlar kesilmekte ve birleştirilerek giysilere dönüştürülmektedir. Hazırlanan giysiler, perakendecilere taşınmaya, mağazalarda dağıtıma ve nihai tüketiciye satılmak için hazır hale gelmektedir. Tüketiciler bir zaman aralığında bunları kullanmakta ve sonrasında ürünlerin kullanım ömrü dolmaktadır [15].

2.1.1.1 Pamuğun İşleme Süreci

Pamuk, tropikal kökenli bir bitki olmasına rağmen, hem nemli-sıcak ılıman hem de yarı kurak sıcak ılıman bölgelerde yetiştirilebilmektedir. Bu nedenle, farklı toprak, iklim ve tarımsal uygulamalara uyum sağlamakta, hatta aynı bölge içinde bile farklı yetiştirme koşullarında üretilebilmektedir. Yetiştirilen pamuk türü ile yerel toprak ve iklim koşulları, tarım ve işleme yöntemlerinin seçiminde belirleyici faktörlerdir. Bu faktörler ise pamuk üretiminin su tüketimi ve ekolojik ayak izi üzerindeki etkilerini doğrudan şekillendirmektedir [16].

Ham pamuktan iplik üretimi, çeşitli teknik ve endüstriyel süreçlerden meydana gelmektedir. Bu süreçler şu şekilde sıralanabilir:

- Yetiştirme: Pamuk, uygun iklim ve toprak koşullarında ekilmektedir. Tohumların ekimi sonrası bitkiler büyüyüp çiçeklenmekte ve olgunlaşarak kozalar oluşturmaktadır.
- Hasat: Pamuk kozaları olgunlaşmakta, lifler koza içerisinde gelişmekte ve belirli bir aşamadan sonra hasat işlemi gerçekleştirilmektedir.
- Çırçırlama: Hasat edilen pamuk, çırçırlama işlemine alınmaktadır. Sonrasında tohumlarından ayrıştırılarak temizlenmekte ve "lif" formuna getirilmektedir.

- Temizleme: Elde edilen pamuk lifleri, üretim sürecine uygun hale getirilmek için çeşitli mekanik işlemlerle temizlenerek homojen hale getirilmektedir.
- Taraklama: Temizlenen pamuk lifleri, taraklama makineleri aracılığıyla paralel hale getirilerek düzenlenmekte ve sürekli bir şerit oluşturulmaktadır.
- Taranmış İplik Üretimi: Taraklama aşaması sonrası, lifler tarama makinelerinde işlenerek safsızlıklarından arındırılmakta ve daha düzgün, homojen bir yapı kazanmaktadır.
- Fitil Oluşturma: Tarama sonrası elde edilen lif şeritleri, mukavemetlerini artırmak amacıyla bükülerek inceltilmekte ve bobinlere sarılmaktadır. Bu aşamada materyal "fitil" olarak adlandırılır.
- Eğirme: Son aşamada, fitil bükülerek nihai iplik formuna dönüştürülmekte ve konilere sarılarak dokuma veya diğer tekstil üretim süreçlerinde kullanılmak üzere depolanmaktadır.
- Dokuma veya Örme: Eğrilmiş iplikler, kumaş üretmek amacıyla dokuma veya örme işlemlerine tabi tutulmaktadır.
- Apre ve Son İşlemler: Pamuk kumaşlar, son kullanıcıya uygun özellikler kazandırmak amacıyla apre işlemleri yapılmaktadır. Bu, yumuşaklık, su iticilik veya kırışıklık önleyici özellikler sağlayabilmektedir.
- Bitirme İşlemi: Bu aşama, kumaşın nihai kullanım amacına uygun olarak son şekli almasını sağlamaktadır.

Bu süreçler, ham pamuğun işlenerek tekstil üretimine uygun, yüksek kaliteli iplik haline getirilmesini sağlamaktadır [16].

2.1.1.2 Polyesterin İşleme Süreci

Polyester, tek başına veya doğal ya da diğer elyaf türleri ile karışımı ile en yaygın kullanılan sentetik malzemedir [17]. Sentetik kumaşlar ucuz, bol ve kullanışlı oldukları için büyük bir başarı yakalamışlardır. Ancak sorunlardan muaf değildir. Uzun vadeli üretimi belirsizdir. Bunun nedeni tükenebilir bir kaynak olan petrolden üretilmesidir. Bir diğer sorun, üretim süreci boyunca yüksek enerji girdileri gerektirmektedir. Eğer bu enerji yenilenebilir kaynaklardan sağlanmazsa, atmosfere CO_2, partiküller, hidrokarbonlar, azot oksitleri, kükürt oksitleri ve karbon

monoksit gibi büyük miktarda emisyon salınmasına yol açmaktadır [16]. Polyesterin işleme süreci aşağıdaki gibidir:

- Kırılma: Petrol rafinajı sırasında uzun zincirli hidrokarbonlar, kısa zincirli ürünlere ayrılmaktadır. Etilen, PET üretimi için başlangıç bileşiğidir.
- Ayrıştırma: Kırılma işleminde ortaya çıkan ksilen izomerleri ayrılmaktadır.
- Oksidasyon ve Esterifikasyon: Para-xilen oksitlenerek tereftalik asit (TPA) üretilir ve sonra etilen glikol ile reaksiyona girerek bishidroksi etil tereftalat (BHET) oluşturmaktadır.
- Erime Polimerizasyonu: Monomerler sıvı fazda polimerleşerek amorf PET oluşturmaktadır.
- Katı Hal Polimerizasyonu: Polimerin moleküler ağırlığı artırılmakta ve kısmi kristalin reçine elde edilmektedir.
- İplik Hazırlığı: Polimer reçineleri dışarıdan temin edilirse, ısıtılarak iplik üretimine hazırlanmaktadır.
- İplik Çıkartma: Erimiş polimer, spinneret adı verilen cihazdan geçirilip soğutulup sertleştirilerek iplik haline getirilmekte ve sarılmaktadır [16].

Bu süreçlerin sonunda polyester ipliği oluşmaktadır.

2.1.2 Üretim Teknikleri ve Çevresel Etkileri

Tekstil üretimi, uzun üretim ve ıslak işleme aşamalarının sonucudur. Bu üretim süreçleri öncelikle iplik ve kumaş sonrasında konfeksiyon üretimini ve ıslak işlemleri içermektedir. Tekstil ıslak işleme (TWP) endüstrisi, önemli miktarda su, kimyasal, boya ve enerji tüketen çeşitli ön işlem (ön arıtma), ana işlem (baskı ve boyama) ve son işlem (bitim işlemleri) aşamalarına dayanmaktadır. Tüm bu işlemler ile optimum performans ve istenen görsel etkileri sağlama açısından kritik bir öneme sahiptir [18].

Tekstil sektörü özellikle tasarım, renk ve estetik açısından piyasaya yön veren güçlü bir araçtır. Renklendirme süreçlerinde, boyama ve baskı önemli katkılarda bulunmaktadır. Bu işlemler sonrası yüksek miktarda atıksu oluşumu gözlemlenmektedir. Bu atıksular, insan ve çevre sağlığı için büyük tehdit oluşturmaktadır. Bunun sebebi, atıksuların içerisinde yüksek dozda kimyasal madde bulunmasıdır [19]. Kimyasal madde haricinde, süreç boyunca yüksek miktarda su tüketimi mevcuttur. 1 kg kumaşın işlenmesi için 70 ila 150 litre su ve

diğer kimyasallar gerekmektedir [20]. Çin, dünyanın en büyük tekstil üreticilerinden biridir ve küresel tekstil üretiminin yaklaşık %54'ünü gerçekleştirmekte olup her yıl 25.000 milyon tondan fazla atık su üretmektedir. Bu atıksuların çevreye bırakılmadan önce iyi bir arıtılma işleminden geçmesi gerekmektedir. [19]. Endüstri, yüksek sıcaklıkları, tehlikeli kimyasal kullanımını ve kumaş işleme süreçlerinde yüksek termal ve elektriksel enerji tüketimini gerektirmektedir. Ayrıca, sera gazı salınımı ile küresel ısınmaya olumsuz yönde katkı sağlamaktadır. Bu süreçlerin tamamında kullanılan kimyasallara maruz kalmak, ekosistemin abiyotik ve biyotik bileşenleri ve insan/hayvan sağlığı üzerinde kısa ve uzun vadeli zararlara yol açabilmektedir.

Boyama, ağartma ve haşıl sökme gibi işlemlerin sırasında yüksek miktarda enerji sarfiyatı olmaktadır. Gelişmekte olan ülkeler, çoğunlukla fosil yakıtlar üzerine kurulu üretim süreçlerine sahip olduğundan, yenilenebilir enerji kaynaklarının tükenmesine yol açmaktadır [21].

Hammaddeden nihai ürün oluşana kadar bir dizi mekanik, fiziksel ve kimyasal süreç mevcuttur. Bu süreçler genel olarak üç ana aşamada değerlendirilmektedir:

- İplik Eğirme:
  Enerji yoğun bir süreç olarak bilinmektedir ve hammadde ipliğe dönüştürülmektedir. Modern iplik eğirme teknikleri ile enerji ve su tüketimi azaltılmaya çalışılmaktadır. Örneğin, açık uç eğirme (open-end spinning) teknolojisi ile halkalı eğirme yöntemine kıyasla enerji verimliliği %30 artmaktadır [22].
- Dokuma ve Örme:
  Kumaş yapısının oluşturulma aşamasıdır. Dokuma işlemi sürecinde kullanılan tezgahların enerji verimliliği, karbon ayak izini belirlemede önemli bir faktördür. Ayrıca, geleneksel yöntemleri bırakmak ve yeni nesil elektronik kontrollü versiyonları kullanmak enerji tüketimi %20'ye kadar düşürebilmektedir.
- Terbiye İşlemleri:
  Boyama, apreleme ve ağartma gibi işlemleri kapsayan aşamadır. Genellikle en fazla çevresel etki bu süreçte yaratılmaktadır. Bu aşamanın çevresel açıdan en önemli sorunları, işlemler sırasında yüksek su tüketimi ve kimyasalların kullanımı ile oluşan su kirliliğidir. Örneğin, dünya

genelindeki tekstil boyama işlemlerinde yılda 20 milyar ton su tüketildiği tahmin edilmektedir [23].

Tekstil üretim süreçleri hem ekonomik sonuçları hem de çevresel etkileri açısından çok yönlü bir inceleme gerektirmektedir. Hammaddenin işlenmesinden üretim tekniklerine kadar olan her bir aşama, çevresel sürdürülebilirlik çerçevesinde yeniden değerlendirilmelidir. Modern teknolojiler, geleneksel yöntemlerin yerini almış hem çevresel ayak izini azaltmakta hem de sektörel rekabet gücünü artırmıştır. Modern üretim teknikleri, çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik çeşitli yenilikçi çözümler sunmaktadır. Su tüketimini azaltmak için CO_2 bazlı boyama teknikleri ve enerji tüketimini düşürmek için plazma bazlı apreleme yöntemleri gibi ileri teknolojiler, tekstil sektörünün dönüşümüne katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, tekstil üretiminde sürdürülebilirlik hedeflerinin başarılması, sadece teknolojik yeniliklerle değil, aynı zamanda hammadde seçiminden atık yönetimine kadar bütüncül bir yaklaşım benimsemekle mümkün olacaktır [18].

2.2 Tekstil Üretim Süreçlerinde Enerji ve Su Tüketiminin Çevresel Boyutları

Tekstil endüstrisi, üretim süreci boyunca önemli miktarda enerji ve su tüketen, hammadde kullanımından başlayıp ürünün nihai tüketiciye ulaştırılmasına kadar olan bu zincirde çeşitli çevresel etkileri olan geniş bir sektör olarak bilinmektedir. Bu etkiler arasında su ve enerji tüketimi, arazi kullanımı, atık yönetimi ve kirleticiler gibi çoğaltılabilen birçok alan kendini göstermektedir. Özellikle tekstil üretiminde bu etkiler göz önüne alındığında en yüksek etki, enerji ve su kullanımı ile dikkat çekmektedir. En çok su tüketiminin olması ve yüksek dozda kimyasalın çevreye bırakılması boyama ve terbiye gibi işlemlerden kaynaklanmaktadır. Böylece su ekosistemlerinde ağır kimyasal tahribat oluşmakta ve çevresel toksisite seviyesi artmaktadır. Fosil yakıtlara bağımlılığı ile bilenen enerji tüketimi tekstil endüstrisinin karbon ayak izini büyütmekte ve ciddi çevresel zorlukları da beraberinde getirmektedir. Endüstrinin daha çevre dostu olması için birtakım önlemler alınması gereklidir. Bunlar yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, etkili atıksu arıtımı ve su tüketimini en düşük seviyeye taşıyan teknolojilerin kullanımı ile olabilmektedir [24].

2.2.1 Hammadde Kullanımı

Hem küresel düzeydeki etkiler hem de ekonomik etkiler ile tekstil sektörü dünyada önemli bir yere sahip sanayi koludur. Tekstilde ilk adım hammadde seçimi ile atılmaktadır ve bu seçim çevresel sürdürülebilirlik ile yakından ilişkili bir konudur. Üretim maliyetlerinin de önemli bir etken olması dışında toksik kimyasal madde kullanımı, su ve karbon ayak izi gibi çevresel faktörler de bu seçimlerin yapılmasında doğrudan etkili olmaktadır.

Tekstil sektöründe kullanılan hammaddeler, doğal ve insan yapımı lifler olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Elde edilme kaynaklarına göre sınıflandırma yapılmaktadır. Tablo 2.1'de tanımlanan kısa kodları ile birlikte de kullanılan liflerin İngilizce-Türkçe karşılıkları verilmiştir.

Doğal lifler doğada kendiliğinden oluşan lifler olarak bilinmektedir. Doğal lifler arasında bitki bazlı doğal lifler, hayvansal lifler ve mineral lifler bulunmaktadır. Bitki bazlı doğal lifler, tekstil ve konfeksiyon gibi çeşitli kullanım alanları bulmaktadır. Doğal lifler daha az sağlık riski taşır ve çevre için daha güvenilir malzemelerdir [25]. Geri dönüştürülebilir ve hızlı bir şekilde işlenmek için aşındırma gerektirmez. Doğal liflerin uygun maliyetli oluşu da önemli bir avantajdır [26]. Hayvansal lifler içeriğinde keratin bulundurarak protein bazlıdır. Mineral liflerin ise kullanım alanı kısıtlı olmakla birlikte asbestin yaratmış olduğu sağlıksal problemler dolayısıyla yasaklanmıştır ve kullanım miktarı azalmaktadır [27].

İnsan yapımı lifler, doğal liflere alternatif geliştirilmiştir. Doğal liflerin sınırlı oluşu ve çevresel etkileri göz önüne alındığında sentetik ve yarı sentetik liflerin gelişimi tetiklenmiştir. Sentetik lifler petrokimyasal türevlerden, yarı sentetik lifler ise selüloz gibi doğal kaynakların kimyasal işlemler sayesinde dönüşümü ile oluşmaktadır [28]. Küresel ölçekte sentetik liflerin üretimi doğal lifler ile kıyaslandığında baskın konumdadır. Coğrafi olarak bakıldığında, Hindistan, Çin, Avrupa ve ABD, sentetik tekstil üretiminde lider ülkelerdir. Bu ülkeler arasında Çin, en büyük üretici konumunda olup küresel ölçekte sentetik lif üretiminin %70'ini gerçekleştirmektedir. Çin'i, %7,64 ile Hindistan takip etmekte; bu yüksek üretim kapasitesi, moda trendlerine ve nüfus yoğunluğuna bağlı olarak artmaktadır [29]. İnsan yapımı lifler, düşük maliyetli üretim süreçleri ile tekstil sektöründe çokça kullanılmaktadır. Ancak yüksek karbon emisyonu ve enerji

tüketimi ile mikroplastik kirlilik gibi çeşitli etkilerle ekosistemlerin olumsuz etkilenmesine yol açmaktadır [30].

Doğal ve insan yapımı liflere ek olarak geri dönüştürülmüş lifler de tekstil hammaddelerine örnek olarak gösterilebilmektedir. Geri dönüştürülmüş pamuk ve rPET (geri dönüştürülmüş polyester), atıkların azaltılması ve enerji tasarrufu bakımından önemli bir yer tutmaktadır. Bu olumlu tarafın yanında, üretim süreçlerindeki yüksek enerji tüketimi ve kalitede düşüş gibi olumsuz taraflar da geri dönüştürülme sürecinin iyileştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Tablo 2.1 Liflerin İngilizce-Türkçe karşılıkları ve kısaltmaları

DOĞAL SELÜLOZİK LİFLER		
Türkçe Adı	**İngilizce Adı**	**Kısaltması**
Pamuk	Cotton	CO
Abaka	Abaca	AB
Bambu	Bamboo	BAM
Jüt	Jute	JU
Kapok	Kapok	KP
Kenevir	Hemp	HA
Keten	Flax(Linen)	LI
Koko	Coco	CC
Muz	Banana	BAN
Rami	Ramie	RA
Sisal	Sisal(Agave)	SI
HAYVANSAL PROTEİN İÇEREN LİFLER		
Alpaka	Alpaca	WP
Ankara Tavşanı	Angora Rabbit	WN
Devetüyü	Camel	WK
İpek	Silk	SE

Tablo 2.1 Liflerin İngilizce-Türkçe karşılıkları ve kısaltmaları (devamı)

HAYVANSAL PROTEİN İÇEREN LİFLER		
Türkçe Adı	**İngilizce Adı**	**Kısaltması**
Kaşmir	Cashmere	WS
Kazein	Casein	CS
Kolajen	Collagen	CLG
Lama	Liama	WL
Tiftik	Mohair	WM
Vikunya	Vicuna	WG
Yün	Wool	WO
MİNERAL LİFLER		
Asbest	Asbestos	AS
Cam Elyafı	Glass	GL
BİTKİ PROTEİNİ İÇEREN LİFLERİ		
Aljinat	Alginate	ALG
Mısır	Corn	CRN
Soya Fasulyesi	Soybean	SPF
Yerfıstığı	Peanut	PNY
SENTETİK LİFLER		
Akrilik	Acrylic	PAN
Aramid	Aramide	AR
Elastan	Spandex	EL
Elastodiyen	Elastodiene	ED
Elastomultiester	Elastomultiester	EME
Flor Lifleri	Fluoro Fibers	PTFE
Klorlifi	Chlorofibre	CLF

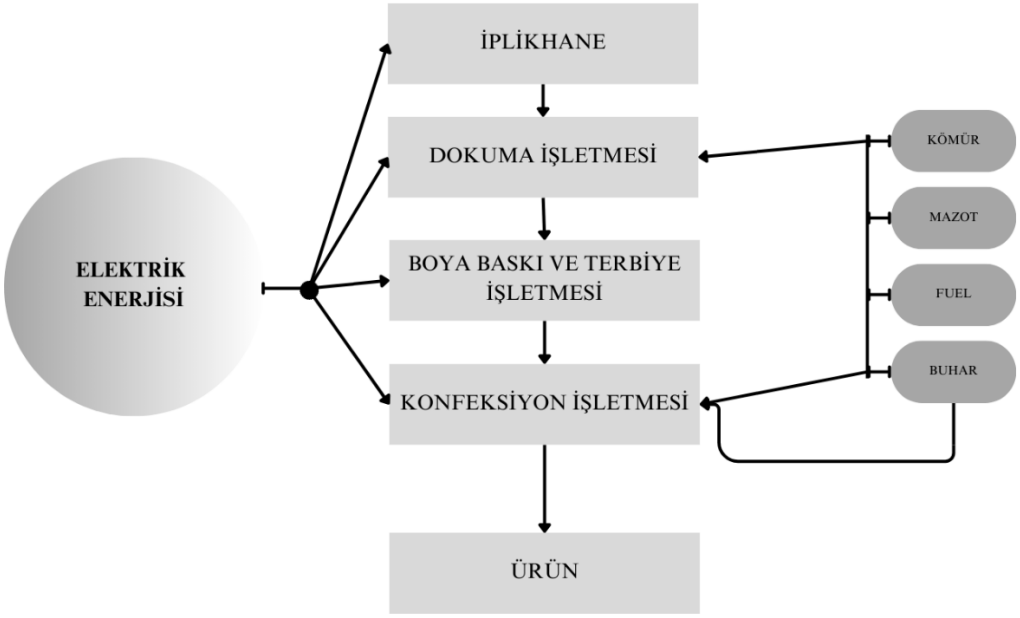
Tablo 2.1 Liflerin İngilizce-Türkçe karşılıkları ve kısaltmaları (devamı)

SENTETİK LİFLER		
Türkçe Adı	**İngilizce Adı**	**Kısaltması**
Modakrilik	Modacrylic	MAC
Polibenzin	Polybenzimidazole	PBI
Polientilen	Polyethylene	PE
Poliolefin	Polyolefine	PO
Polipropilen	Polypropylene	PP
Poliüretan	Polyurethane	PU
Polyamid	Poliamide	PA
Polyester	Poliester	PES
İNORGANİK LİFLER		
Altın Elyaf	Gold Fiber	AU
Cam Elyafı	Glass Fiber	GF
Karbon	Carbon	CF
Metal	Metalic	MTF
Seramik	Ceramic	CEF
SELÜLOZ ESTERİ İÇEREN LİFLER		
Asetat	Acetate	CA
Triasetat	Triacetate	CTA
REJENERE SELÜLOZ LİFLER		
Bambu Rayonu	Rayon from Bamboo	CBAM
Kauçuk	Rubber	RUB
Kupro	Cupro	CUP
Liyosel	Lyocell	CLY
Modal	Modal	CMD
Viskoz	Viscose	CV

2.2.2 Enerji Tüketimi

Tekstil sektörü, enerji tüketimi ve verimliliği yönünden oldukça önemli bir sektör olarak önde gelmektedir. Geniş işlem yelpazesine sahip olması ve çeşitli üretim süreçlerini içermesi sebebiyle karmaşık bir yapıya sahiptir. Enerji tüketimi, iplik üretiminden başlayıp nihai tüketiciye kadar geçen süreçte değişiklik göstermektedir. Örneğin, elektrik kullanımı iplik üretiminde yoğunken, termal enerji tüketimi boyama ve terbiye gibi ıslak işlem süreçlerinde daha ön plandadır. En fazla enerji tüketen alanlardan biri ıslak işlem süreçleridir [31]. Kullanılan toplam enerjinin yaklaşık %23'ü dokuma, %34'ü iplik eğirme, %38'i kimyasal işlemler ve %5'i diğer çeşitli amaçlar için harcanmaktadır. Kimyasal işlemlerde enerji tüketimi ağırlıklı olarak suyun ısıtılması ve tekstil malzemelerinin kurutulması için kullanılan termal enerjiye dayanırken, iplik eğirme ve dokuma süreçlerinde elektrik tüketimi baskın rol oynamaktadır.

Şekil 2.3, konfeksiyon ve tekstil endüstrisinin üretim aşamalarında kullanılan kaynaklar ve enerji türlerini göstermektedir. Kullanılan enerjiler genel olarak mazot, kömür, buhar ve fuel-oil gibi kaynaklardan sağlanmaktadır. Konfeksiyonlarda ise ütüleme işleme sırasında elektrik veya buharla yapılmaktadır [32].



Şekil 2.3 Tekstil endüstrisinin üretim aşamalarında kullanılan kaynaklar ve enerji türleri [32]

Yenilenemeyen enerji kaynakların tüketimi çoğunlukla tekstil ürünlerinin üretim aşamasında (%15–20) değil, esas olarak tüketiciler tarafından gerçekleştirilen, ürünlerin kullanım ömrü boyunca yıkama, kurutma ve bakım süreçlerinde (%75–80) meydana gelmektedir. Tekstil endüstrisinde enerji kullanımına dair veriler yaygın olarak mevcut olmasına rağmen, enerji üretim kaynakları (kömür, elektrik, doğalgaz veya diğer kaynaklar) nedeniyle ortaya çıkan CO_2 emisyonlarını tahmin etmek zor olmaktadır. Bunun nedeni, tekstil endüstrisinin küçük ve orta ölçekli işletmelerin hâkim olduğu, heterojen bir sektör olmasından kaynaklanmaktadır [33]. Bu gibi süreçlerde enerji verimliliğinde artış sağlanması için, ısı yalıtımı, atık ısı geri kazanımı ve düşük enerji tüketimli ekipmanların kullanımı gibi çeşitli önlemler alınabilir [31]. Bu konu hakkında Türkiye'de yapılmış bazı çalışmalar mevcuttur [34]. Örneğin, Bursa'da bir dokuma kumaş fabrikasında, işletmenin CO_2 emisyonunun ve toplam enerji tüketiminin sırasıyla %13,5 ve %17,1 oranlarında azalmasının sürdürülebilir üretim uygulamaları ile olduğu bulunmuştur [35]. Bir diğer çalışma da İstanbul'da yapılmıştır. Tekstil firmasında atıksu geri kazanımı ve yalıtım gibi enerjinin yönetilme uygulamaları ile işletmeye sağlanacak faydalar ele alınmıştır. Bu sayede %11 oranında azalma enerji maliyetlerini düşürmede görülmüştür [36].

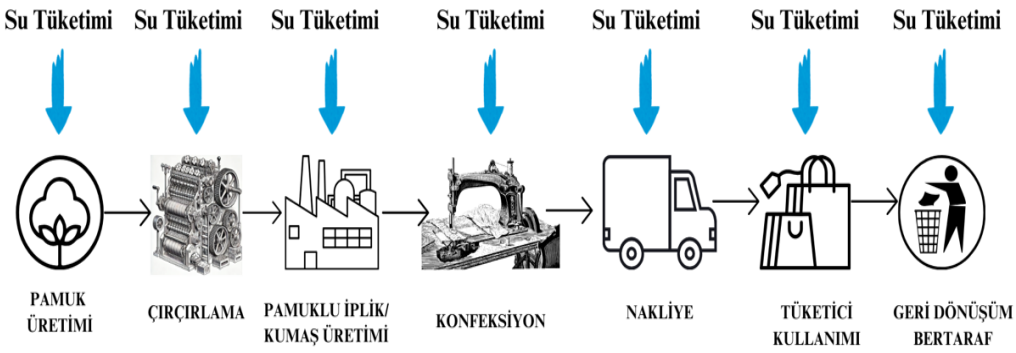
Enerji tüketimini azaltma tekstil sektöründe oldukça önemli bir noktadır. Yüksek verimle çalışan motorların kullanımı ve üretim süreçlerine optimizasyonunun sağlanması tüketimde büyük oranda düşüşe sebep olabilir. Enerji tüketiminin optimize edilmesi sadece ekonomik sebeplerden pozitif etki yaratmayıp, çevresel kirliliğinin de artmasının önüne engel oluşturmaktadır. Bu sebeple, tekstil sektöründe yeni teknolojilerin geliştirilmesi benimsenmelidir. Ön maliyetler göz ardı edilerek enerji verimliliği teknolojileri sektörün her aşamasına entegre edilmesi gerekmektedir [31]. Tekstil endüstrisinde yenilenebilir enerji kullanımına yönelik farklı seçenekler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır:

- Güneş enerjisi yardımıyla elektrik üretimi
- Elyafların kurutma işlemini direkt güneş enerjisiyle gerçekleştirme
- Üretim tesislerinin çatılarına rüzgâr enerjisiyle çalışan turbo havalandırıcıların yerleştirilmesi
- Tekstil endüstrisinde suyun ısıtılması için güneş enerjisinin kullanılması

Ayrıca, tesislerde en büyük enerji kayıplarının nerede olduğunu, hangi kayıpların öncelikli olarak ele alınması gerektiğini ve bu kayıpları azaltmanın genel yolları bulunmalıdır.

2.2.3 Su Tüketimi

Tekstil sektörü, diğer sektörlere kıyasla küresel düzeyde en büyük su tüketicilerindendir. Önemli çevresel sorunlara yol açan bu sektör, hammaddelerin arazilerde yetiştirilmesinden başlayarak üretimin her sürecinde yüksek miktarda su tüketmektedir. Boyama, apreleme, temizleme ve yıkama gibi çeşitli aşamalarda su yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle geleneksel metotlarda boyama yöntemlerinin kullanılması, suyun büyük kısmının kirlenmesine ve çevresel kirliliğe yol açmaktadır. Ayrıca suyun aşırı kullanılması, su sıkıntısı çeken bölgelerde ekosistem baskılarına ve su kaynaklarının tükenmesine sebep olmaktadır. Tekstil üretiminde kullanılan su hacmi, kullanılan hammaddelere ve üretim türüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Şekil 2.4'te pamuklu kumaş üretiminin hangi aşamalarda su tükettiği gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Pamuklu kumaş yaşam döngüsü basamakları ve su kullanım noktaları

Tekstil endüstrisinde su tüketimi, yalnızca kullanım miktarı ile sınırlı kalmamaktadır. Aynı zamanda kullanılan kullanım biçimi, suyun kaynağı ve çevresel etkileri de dikkate alınmaktadır.

Tekstil sektöründe ürünlerin üretiminde kullanılan su temiz ve taze olmalıdır. Üretim sonucu ortaya çıkan ürünlerin kalitesi suyun bulanıklık, renk ve içerdiği metallere bağlı olarak değişiklik göstermektedir [37]. Tekstil tesislerinde boyama süreçlerinde ve bitim işlemleri spesifik su tüketimi 10-35 L/kg ürün aralığında değişmektedir. Elyaf ve iplik üretiminde ise su tüketim değerleri 35-180 L/kg ürün arasında değişiklik göstermektedir. İplik ve kumaş bitim tesislerinde spesifik su

tüketim değerleri sırasıyla 43-212 L/kg ürün ve 60-216 L/kg ürün aralığındadır [38].

Bir tekstil ürününün tüm yaşam döngüsü aşamaları açısından su kullanımı oldukça önemlidir. Levi Strauss & Company, 2007'de bir yaşam döngüsü analizi (LCA) çalışması yapmıştır ve bir kot pantolon üretiminde su kullanımını incelemiştir. Çalışma, bir kot pantolonun tüm yaşam döngüsünü tamamlamak için 3000 litreden fazla suya ihtiyaç duyduğunu ve bu suyun %45'inin kullanım aşamasında harcandığını ortaya koymuştur [39]. Ayrıca, tekstil endüstrisindeki yoğun su tüketimi, doğal tatlı su kaynaklarının tükenmesine neden olabilir. Bu nedenle, doğal su kaynaklarını ve çevreyi korumak için tekstil endüstrisinde su tüketiminin, atıksu miktarının ve atıksu kirlilik yükünün azaltılması holistik bir yaklaşımla ele alınmalıdır.

2.2.4 Atıksu Yönetimi ve Kirleticiler

Yoğun su kullanımı olan tekstil sektöründe (klasik bir kumaş başına 200-400 L) [40] atıksu yönetimi, gaz emisyonları, atıksu deşarjları ve katı atıklardan daha zor çözüm bulunmaktadır. Kimyasallar, yardımcı maddeler, boyarmaddeler ve diğer katkı malzemeleri suya karışarak zor ve karmaşık bir kirletici yükü oluşturmaktadırlar. Bunlar göz önüne alındığında, üretim süreçlerinde farklı özelliklere sahip çeşitli kimyasal maddeler ve yardımcı maddelerin kalıntılarını içeren atıksular üretilmekte ve deşarj edilmektedir. Çeşitliliğin fazla olması sebebiyle ortaya çıkan bu atıksulara, konvansiyonel atıksu arıtma tesislerinde yeterince arıtma yapılamamaktadır [40]. Boyalar, fenoller, deterjanlar, metaller ve toksik organik bileşikler gibi bileşenler, geleneksel biyolojik arıtmalara karşı dirençlidir. Bu nedenle arıtım yapılmadan (reaktif boyarmaddelerin bir kısmı liflere bağlanamaz) çıkış sularına geçebilmektedir ve yetersiz arıtma durumunda ekosistemler ve insanlar üzerinde uzun vadeli risklere yol açabilmektedir [41], [42]. Bu tür atıksulara neden olan kimyasalların kullanımını kimyasal ikame yoluyla en aza indirmek ve tekstil fabrikalarında aşırı su kullanımını azaltmak önemlidir [43].

19. yüzyıl ortalarına kadar insanlar ipek, pamuk ve yün gibi doğal lifler kullanmaktaydı ve doğal boyalar kullanmaktaydı. Ancak 1800’lerde ilk sentetik boya keşfedilmiştir. Sentetik liflerin de geliştirilmesiyle çeşitli boya türleri de ortaya çıkarak tekstil ürünlerinin renklendirilmesi birçok kimyasalın da atıksulara

karışmasını sağlamıştır. Bu boya türleri naftoller, kükürt, nitroso, azoikler, trifenil metan, ftalosiyaninler, siyanürik klorür bazlı reaktifler, azo, antrakinon ve stilben olarak verilebilmektedir. Atıksular çoğunlukla çözücüler ile kullanılan yağları ve renklendirici maddeleri içermektedir. Gelen bu atıklar çevre için oldukça tehlikelidir. Bitim işlemlerinde kullanılan kimyasallar yüksek oranda kumaşta kalmaktadır. Kalan kısım da kullanıcıların yıkama işlemi sonrası çevreye karışmaktadır [44].

Tekstil üretim süreçleri, kimyasal kullanımına dayalı olması nedeniyle ciddi çevresel etkilere sahiptir. Eğirme işlemlerinde kullanılan yumuşatıcılar ve eğirme yağları gibi maddeler, boyama öncesinde uzaklaştırılmalı ve bu süreç organik yükü artırarak hem atıksularda hem de egzoz havasında kirleticiye neden olmaktadır. Özellikle haşıl sökme işlemi, atıksulardaki toplam kimyasal oksijen ihtiyacının (KOİ) %70'ine varan kirlilik oluşturabilmektedir. Doğal liflerin ön işlemleri, harman yağları, pestisitler ve deterjanlar gibi maddelerden kaynaklı su kirliliğine yol açmaktadır. Sentetik liflerde ise oligomer, monomer ve katalizör kalıntıları gibi safsızlıklar hem havaya hem de suya karışarak çevresel sorun yaratmaktadır. Boyama işlemleri sırasında kullanılan boyalar ve kimyasallar, suda düşük biyoçözünürlük, toksisite ve ağır metal emisyonlarına neden olmaktadır. Ayrıca, reaktif boyalarla yapılan pamuk boyamada kullanılan yüksek miktarda tuz, su ekosistemlerini tehdit edebilmektedir. Bitim işlemleri ise düşük miktarda atıksu oluştursa da içerdiği zehirli kimyasallar ve yüksek KOİ nedeniyle büyük kirlilik konsantrasyonlarına yol açmaktadır. Baskı işlemleri ise baskı patı artıkları, yıkama ve temizleme suları ile uçucu organik bileşiklerden kaynaklanan kirlilikle öne çıkmaktadır [45].

Atıksu arıtma süreci, büyük miktarlarda çamur üretmekte ve atıksudaki maddelerin neredeyse tamamı bu çamurda birikmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde, bu çamur genellikle güvenli olmayan depolama alanlarına atılır ve zamanla bu kimyasallar çevreye sızmaktadır. Tekstil atıklarının zararlı etkisini azaltmak ve güvenli bir ortam yaratmak için, bu atıkların sürdürülebilir uygulamalarda kullanılması gerekmektedir.

2.2.5 Arazi Kullanımı

Tekstil sektörü, hammadde üretimi ve işlenmesi sonrasında nihai ürünün tüketici eline ulaşmasına kadar olan süreçte doğal kaynakları kullanmaktadır. Bu da çevresel sürdürülebilirlik konusunda ciddi bir etki yaratmaktadır. Her hammaddenin yetiştirilmesinde geniş tarım alanlarına ihtiyaç duyulur. Özellikle doğal liflerden olan pamuğun tarımı buna örnek olarak verilebilmektedir. Habitatların tahrip edilmesi, ormanların yok olması ve biyoçeşitliliğin azalması ile ekosistem dengesi olumsuz etkilenmektedir [46]. Arazi kullanımı ile ilgili olan bu etkiler yalnızca hammaddelerin üretiminde sınırlı kalmamaktadır. Üretim tesislerin kurulumu, fabrika faaliyetleri ve endüstriyel alanlar da hammadde üretimi ile oluşan etkilere ek olarak gösterilmektedir. Toprak yapısı bozulmakta ve ormanlık alanlar kaybolmaktadır, bu da ekosistemin temel taşlarını zayıflatmaktadır [47].

Doğal lif üretimi için geniş tarım alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. 2020 yılında Avrupa'da tekstil tüketimi için kişi başı yaklaşık 400 m² arazi tedarik zincirlerinde kullanılmıştır [48]. Dünya genelinde tekstil sektöründe Türkiye, önemli bir konuma sahip olması ile yılda yaklaşık olarak 23 bin ton organik pamuk üretimiyle dünya sıralamasında dördüncü sırada endüstriye yön vermektedir [49].

Pamuk Durum ve Tahmin Raporu 2023 verilerine göre uluslararası pamuk fiyatlarında artış ile 2021-2022 sezonunda ekim alanları %4 artmıştır. Dünya genelinde pamuk ekim alanı 32,7 milyon hektardır. Hindistan 12,1 milyon ha ile en yüksek pamuk üretimi yapan ülke olurken, ABD 4,2 milyon ha ile onu takip etmektedir. Üçüncü sırada ise Çin 3,0 milyon ha gelmektedir. Türkiye'de ise yine aynı sezonda Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde 262 bin ha, Ege Bölgesi 98 bin ha, Çukurova Bölgesi 68 bin ha'dır. 23 ilde pamuk üretimi yapılmakta olup, Şanlıurfa, Aydın, Hatay, Diyarbakır, Adana ve İzmir yoğunlaşmaktadır. [50]. Tablo 2.2'de dünyada ve Türkiye'de pamuk üretimi için yıllara göre ekili alanları gösteren veriler verilmiştir.

Tablo 2.2 Dünyada ve Türkiye'de pamuk üretimi için yıllara göre ekili alanlar [51]

	Dünya Genelinde Ekilen Alan (bin hektar)	**Türkiye'de Ekilen Alan (bin hektar)**
2018/19	33.041	519
2019/20	34.471	478
2020/21	31.481	359
2021/22 Durum	32.717	432
2022/23 Tahmin	32.212	573
2023/24 Öngörü	33.072	468

Pamuk dışında keten gibi doğal lifin üretimi Türkiye'de sınırlıdır. Küçük ölçekte belirli bölgelerde yapılmaktadır. Türkiye'de 1961 senesinde 3750 ton keten lifi üretimi, 2018'de 3 tona kadar azalmıştır. Dünya'da Belçika, Belarus, Fransa, Çin ve Ukrayna ülkeleri üretimde ilk sıraları almaktadır [52]. 2018 yılında 240293 hektar alanda keten lifi üretimi yapılmıştır [53]. Tablo 2.3'teTürkiye'de yıllara göre liflik keten üretimi için ekilen alan gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Türkiye'de yıllara göre liflik keten üretimi için ekilen alan [53]

Yıllar	**Ekilen Alan (Da)**
1990	28.000
1995	6.500
2000	3.200
2005	1.760
2010	100
2015	15
2016	25
2017	50
2018	50
2019	25

Viskon ve diğer selüloz bazlı liflerin üretimi doğal lifler ile karşılaştırıldığında daha az arazi ve su ihtiyacı gerekmektedir. Örneğin okaliptüs ağacından üretilen Alman menşeili bir viskon türünde, arazı kullanımı ve su tüketimi diğer liflere oranla daha düşüktür [54]. Türkiye'de ise viskon üretimi, selüloz hammaddesinin ithalatı ile gerçekleşmektedir. Gaziantep'te yapılan bir fizibilite raporunda, Türkiye toplam işlenmiş elyaf ihracat payı %5 olarak verilmiştir [55]. Bambu lifi ise, üretim ve gelişim itibariyle Asya kökenlidir. Subtropikal ve tropikal iklim kuşağında doğal olarak yetiştirilebilmektedir. Genellikle eğimli yamaçlar, orman kenarları ve bozulmuş tarım arazileri gibi alanlarda değerlendirilmektedir [56]. Hindistan, Çin ve Endonezya gibi Asya ülkeleri, geniş alanları ve gelişmiş işleme altyapısıyla küresel üretimde başı çekmektedir. Bu ülkeleri Filipinler, Vietnam ve Tayland gibi diğer Güneydoğu Asya ülkeleri izlemektedir. Ayrıca Brezilya, Kolombiya ve Etiyopya gibi ülkelerde de bambu üretimi arazi rehabilitasyonu politikaları ve kırsal kalkınma çerçevesinde yaygınlaşmaktadır [57]. Sonuç olarak doğal lifler ile selüloz bazlı liflerin kıyaslanmasında, selülozik liflerin daha az su ve arazi kullanımına ihtiyacı olduğunu göstermektedir. Ancak bu artıların yanında enerji tüketimi ve kimyasal kullanımını göz ardı etmemek gerekmektedir.

2.3 Geleneksel Metotların Değerlendirilmesi

Antik çağlardan günümüze kadar tekstil sektörü uzanmaktadır. Pamuk ekimi, dokuma teknikleri ve el ile iplik eğirme gibi teknikler ile yüzyıllar önce Hindistan, Mısır, Çin ve Orta Asya'da bilinmekteydi. 18. yüzyılın ikinci yarısında Avrupa'da başlayan Sanayi Devrimi ile tarihte mekanize üretime geçen ilk sektör olmuştur [58]. Geleneksel metotlar, el işçiliğine bağlı olup, doğal malzemeler ile şekillenmiştir. Bu metotlar, coğrafi özellikler ve kültürel mirasın bir yansıması olarak çeşitlenmektedir. Ülke coğrafyası, yaşam tarzı ve maddi durumuna göre bu doğal malzemelerin kullanımı ile oluşturulan dokusal yüzeyleri; örücülük, dokumacılık, keçecilik gibi ürün oluşturmaya yönelik yöntemler ile ortaya kumaşlar çıkmaktadır [59].

Geleneksel tekstil endüstrisi, her zaman emek yoğun ve yüksek düzeyde çevre kirliliğine neden olan bir sektör olmuştur. Geçmişte, tekstil üretim süreci oldukça karmaşıktı ve birçok ayrıntılı işlemin yürütülmesini gerektirmekteydi. Bu durum, büyük hacimli ancak düşük çeşitlilikte üretim eğilimini ortaya çıkarmıştır.

Böylece, çevresel anlamda önemli etkiler yaratmaktadır. Örneğin, pamuk üretiminde yüksek kimyasal, pestisit kullanımı ve su tüketimi nedeniyle su kirliliği ve biyolojik çeşitlilik kayıpları oluşmaktadır. Polyester üretimi, fosil yakıtlara bağlılığı sebebiyle yüksek enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları dolayısıyla küresel ısınmayı tetiklemektedir. Polyester kumaşlardan ayrışan mikroplastikler, su kirliliğine sebep olarak deniz ekosistemlerine zarar vermektedir. Yün üretiminde ise aşırı otlatma ve metan salınımı ve toprak erozyonu gibi çevresel baskıları artırmaktadır. Geleneksel tekstil üretim süreçlerinde kullanılan makineler de çevresel etkiyi önemli ölçüde artırmaktadır. Örneğin, örme, dokuma ve iplik eğirme gibi işlemler genellikle yüksek enerji tüketen eski teknolojiler kullanılarak yapılmaktadır. Bu makineler, yoğun elektrik tüketmekte ve su buharı gibi yüksek enerjili sistemler kullanmaktadır. Bu durum, enerji verimliliği düşük olan makinelerin yüksek miktarda fosil yakıt kullanımına ve dolayısıyla karbon salınımına yol açmasına neden olmaktadır [60].

Sonuç olarak, geleneksel tekstil üretim süreçleri, enerji ve su tüketimi, kimyasal madde kullanımı, atık yönetimi ve sera gazı emisyonları açısından büyük çevresel etkiler yaratmaktadır. Bu etkiler, sürdürülebilirlik ve çevre koruma açısından ciddi bir tehdit oluşturmakta olup, daha çevre dostu üretim yöntemlerinin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

2.4 Modern Metotların Değerlendirilmesi

Tekstil endüstrisinde çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak amacıyla, geleneksel üretim metotlarının olumsuz çevresel etkilerini azaltmak için bir dizi modern teknoloji geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Bu yenilikçi modern metotlar yardımıyla, daha verimli enerji ve su kullanımı, sürdürülebilir hammadde kullanımı, atıkların yönetimi ve kirletici emisyonlarının azaltılması gibi seçenekler değerlendirilmektedir. Bu teknikler yardımıyla da üretim süreçleri optimize edilmekte, çevresel olumsuz etkiler minimize edilmektedir.

Günümüzde, teknolojinin ilerlemesi ve tüketici alışkanlıklarının farklılaşması ile birlikte, insanlar artık ürün kalitesine ve kişiselleştirilmiş üretim isteklerine daha fazla önem göstermektedir. Bunun sonucu olarak da tekstil kişiselleştirilmiş ve esnek üretim modelleri devreye alınmıştır [61]. Teknolojiler de bu istekleri hedef haline getirerek daha geliştirilmeye ve güçlendirilmeye devam etmektedir.

Endüstrinin dördüncü sanayi devrimi olarak bilinen, dijitalleşme, akıllı teknolojiler ve otomasyon ile dönüşümü sağlanan Endüstri 4.0 ile yalnızca üretim süreçlerini kontrol etmekle kalmayıp, verilen yönetilmesi ve izlenmesiyle sanayi kaynaklı kirliliğin azaltmasına müdahale etmektedir [62]. Tekstil, Giyim ve Moda endüstrileri, dünya genelinde ulusal ekonomilere önemli katkılar sağlarken; farklı ülkelerde farklı verimlilik seviyelerinde faaliyetler göstermektedir. Dijital dönüşümün ve modernleşmenin faydaları açıkça görülmekle birlikte, bu dönüşümün getirdiği zorluklar da önemli seviyededir. Tekstil sektörü, küresel kirliliğin %20'sinden sorumludur. Yapay zeka (AI), Nesnelerin İnterneti (loT) ve robotik gibi teknolojilerin entegrasyonu ile verimli ve akıllı üretim süreçleri artış göstermekte ve ekonomik çıktıları artmaktadır [63]. Özellikle akıllı fabrikalar, gerçek zamanlı veri takibi yaparak karbon salınımlarını kontrol etmektedir [64].

Tekstil ürünleri ve teknikleri, günümüzde hızla gelişen teknolojiler ile sürekli değişmekte ve modern üretim yöntemleri ile sektörde devrim yaratmaktadır. Bu yöntemler sayesinde, üretim süreçleri daha verimli hale gelmekte, sürdürülebilirlik ve çevre dostu olmakta önemli avantajlar sunmaktadır. Bunlardan biri, dijital baskıdır. Geleneksel baskı yöntemlerine nazaran daha az enerji ve su tüketimi gerektiren bu yöntem kişiselleştirme noktasına atıfta bulunmaktadır. Öte yandan, robotik teknolojiler ile üretim bantlarında yer alan insan hataları en aza indirilmekte ve ürün kalitesi artırılmaktadır [65]. Sürdürülebilir malzemeler ve yenilikçi hammaddeler ile kumaş çeşitliliği ve kalitesi de değişmektedir. Örneğin, fosil yakıt temelli lifler yerine biyolojik olarak parçalanan biyobozunur polyester lifleri, nanoteknoloji kullanımı ile leke itici kumaşlar, plastik pet şişelerden elde edilen geri dönüştürülmüş polyester (rPET) lifleri [66] ve antibakteriyel, su geçirmeyen fonksiyonel lifler bunlardan bazılarıdır.

Modern üretim teknikleri, çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik çeşitli yenilikçi çözümler sunmaktadır. Su tüketimini azaltmak için CO_2 bazlı boyama teknikleri ve enerji tüketimini düşürmek için plazma bazlı apreleme yöntemleri gibi ileri teknolojiler, tekstil sektörünün dönüşümüne katkı sağlamaktadır. 3D Baskı teknolojisi ile kumaş israfını azaltan ve özelleştirilebilir ürün tasarımları sunan 3D baskı teknolojisi, tekstil üretiminde yeni bir dönemi başlatmaktadır [67].

Dijital teknolojiler, tekstil endüstrisinde sürdürülebilirlik ve döngüselliği destekleyen önemli bir unsur haline gelmiştir:

- Dijital Ürün Pasaportu: Avrupa Komisyonu'nun stratejileri ile, tekstil ürünlerinin şeffaflığını artırmak amacıyla tedarik zinciri boyunca izlenebilirliği sağlayan dijital ürün pasaportları geliştirilmektedir. Bu pasaport sayesinde ürünle ilgili bilgilerin otoriteler, üreticiler ve tedarik zincirinde bulunan işletmeler arasında aktarılıp paylaşılmasını sağlamaktadır. Ürünleri anlama ve yeni/kullanılmış ürünleri satın almaya karar verme sürecinde destek olmaktadır. Bu sayede geri dönüşüm ve onarım işlemleri kolaylaşmaktadır. Ayrıca, ürünler hakkında kapsamlı bilgiler sunarak, sanayiler için ikincil hammadde kullanımı ve döngüsel ekonomi stratejilerinin karar verme süreçlerinde iyileştirmeye teşvik edilmektedir [68].
- Blockchain Teknolojisi: Tedarik zinciri boyunca şeffaflığı sağlamak ve sahteciliği önlemek için blockchain tabanlı izleme sistemleri uygulanmaktadır. Kapalı döngü tedarik zincirleri aracılığıyla tekstillerin yeniden üretimi ve geri dönüştürülmesi yalnızca %27 oranında gerçekleşmektedir. Bu oranın düşüklüğü iki farklı sebebe dayanmaktadır: Birincisi, ileri teknoloji yatırımları, yeniden üretim maliyetlerinin yüksek oluşu ve süreçlerin karmaşık yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. İkincisi ise, marka güveninin yeniden üretilmiş ürünler için düşüş olması, tüketici tarafının yeniden üretim ve geri dönüşüm süreçleri hakkında yeterli bilgiye sahip olmaması nedeniyle satış zorlukları yaşanmaktadır. Satın alma isteklerinin düşmesiyle geri dönüşüm ve yeniden üretim oranları azalmaktadır. Tekstil endüstrisinde maliyetleri aşabilmek adına, birçok ülkede çevre vergisi ve yeniden üretim sübvansiyonlarını içeren Hükümet Fon Politikaları uygulamaya alınmaktadır. Bu politikalar sayesinde atıkların geri dönüşümü ve yeniden üretimi teşvik edilmektedir. Çin'in vergi indirimli destek politikaları ve Avrupa Komisyonu'nun Döngüsel Ekonomi Eylem Planı ve örnek olarak verilebilmektedir. Ayrıca, blok zinciri teknolojisi, geri dönüşüm süreçlerinin şeffaflığını sağlamakta ve marka güvenini artırmaktadır. Ayrıca pazar talebini de güçlendirmektedir [69].
- Otomatik Sistemler ve Robotik Kullanımı: Akıllı makineler sayesinde üretim hataları azalmakta ve enerji verimliliği artmaktadır.

- Akıllı Tekstil: Bilgi çağında, fonksiyonel elyaflar birçok inceleme alanı bulmuştur. Fonksiyonel elyaflar, ısı yalıtımı, iyon değişimi, yüksek elastikiyet, antistatik özellik, antibakteriyel, ışık rehberliği, radyasyon koruma ve alev geciktirici gibi özel işlevleri olan elyafları ifade etmektedir. Bu elyaflar sıradan tüketim ürünü olmaktan çıkıp teknoloji ürünlerine dönüşmüştür. Bu sayede lif sanayilerindeki rekabet artmıştır. Akıllı ürünlerin işlevsel gereksinimlerini karşılamak için enerji depolama, enerji toplama, şekil deformasyonu, renk değiştirme, algılama ve biyometrik özellikler gibi sahip ileri düzey elyaflar büyük ilgi görmektedir. Son beş yılda, fiber şekilli güneş pilleri, lityum iyon piller, elektro-kromik cihazlar ve aktüatörler gibi çeşitli akıllı elyaf cihazları başarıyla geliştirilmiş ve bu elyaflar, giysilere entegre edilmiştir [70].
- Dijital Fabrika ve Siber-Fiziksel Sistemler (CPS): Sanal ortamda gerçek üretim süreçlerinin modellenmesi ile en iyi üretim stratejileri belirlenmektedir.
- Dijital İkiz (Digital Twin): Üretim süreçlerinin sanal ortamda simülasyonu yapılmakta ve hata oranları azaltılmaktadır.

Tekstil endüstrisinde modern uygulamalar ve dijitalleşme, sürdürülebilirliğe ve döngüsellik prensiplerine uyumu artırmaktadır. Dijital teknolojiler, enerji ve kaynak verimliliği sağlarken aynı zamanda atıkları azaltmakta ve tedarik zinciri boyunca şeffaflığı artırmaktadır. Gelecekte, tekstil endüstrisinin tam anlamıyla döngüsellik prensiplerine uyum sağlaması için daha fazla yenilik ve yatırım gerekecektir [67].

3
TEKSTİL ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAMMADDE TÜRLERİ

Tekstil ve giyim endüstrisi, önemli bir geçim kaynağıdır; ancak yaşam döngüsü boyunca önemli ölçüde enerji ve kaynak tüketimi, insan sağlığı ve çevre üzerinde büyük etkiler yaratmaktadır [71]. Giysi üretiminde kullanılan hammadde seçimi ile çevresel etkiler arasında önemli bir bağ bulunmaktadır. Örneğin, pamuk gibi doğal lifler genellikle daha çevre dostu bir seçenek görülmektedir. Ancak, pamuk, yoğun pestisit ve su kullanımıyla bilinmektedir. Benzer şekilde, 'doğal' boyalar da çevre üzerinde beklenmedik olumsuz etkiler yaratabilmekte; bunun sebebi boyaların üretimi için milyonlarca böceğin veya bitki kabuklarının toplanması gerekebilmektedir. Üstelik, bu doğal boyalar çoğu zaman toksik metaller içeren ek kimyasalların kullanılmasını da gerektirmektedir. Lif seçimi, tüketici bakım gereksinimlerini de doğrudan etkileyebilmekte ve bu da dolaylı olarak enerji, su ve toksik kimyasal tüketimini artırabilmektedir [13].

17. yüzyıla kadar tekstil üretimi evlerde yapılmaktaydı ve kenevir, keten ve pamuk gibi bitkisel kaynaklar ile ipek ve yün gibi hayvansal kaynaklar kullanılmaktaydı. Endüstri devrimiyle birlikte üretim süreci mekanize edilerek tamamen yeni ve daha hızlı işlem yöntemleri geliştirilmiştir. 19. yüzyılın sonuna kadar tüm lifler doğal kaynaklardan üretilmiştir. 20. yüzyılın başlarında, viskon yöntemiyle rejenere selüloz liflerinin üretimi başlamıştır ve hızlıca baskın hale gelmiştir. Sentetik lifler ise 1940'larda, kimyasal olarak sentezlenmiş polimerlerden üretilerek tekstil pazarına girmiştir [72].

Doğal lifler, hayvansal (protein bazlı) ve bitkisel (selüloz bazlı) olarak iki ana gruba ayrılarak tekstil lifi üretiminin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır. Bitkisel lifler, bitkilerden elde edilen selülozdan oluşmaktadır [73]. Yeryüzünde en bol bulunan doğal polimer selülozdur. Selüloz, biyolojik olarak yenilenebilir, parçalanabilir ve

uyumlu bir polimerdir. Kâğıt, gıda katkı maddeleri, selüloz bazlı plastikler, bezler, kaplamalar ve kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Pamuk, tüm doğal liflerin yaklaşık %90'ını oluşturmakta olup öncelikle giyim, sonrasında ev tekstili ve endüstriyel ürünlerde en yaygın kullanılan lif olarak bilinmektedir. Selülozik lif kullanımının 2030'a kadar kişi başına 3,7 kg'dan 5,4 kg'a çıkması beklenmektedir. Bununla birlikte, pamuk üretiminin arsa kısıtlamaları sebebiyle talepleri doğruca karşılamayabilmekte ve bu da yapay selüloz liflerin üretimi için yeni fırsatlar yaratabilmektedir [74]. Sentetik lifler ise 1990'lı yıllardan beri pazara hakimdir ve pamuktan daha fazla kullanılmaktadır. Petrol türevi hammaddelerden sentezlenen bu lifler, 2019'da dünya genelindeki toplam lif üretiminin %63'ünü oluşturmaktadır. En yaygın sentetik lif polyester olup, toplam üretimin yaklaşık %52'sine sahiptir. Aynı dönemde pamuğun pazar payı %23 seviyesinde kalmıştır [74].

3.1 Pamuk

Tekstil endüstrisinde pamuk lifi, en yaygın kullanılan lif türüdür ve tekstilin tüm alanlarında kullanımı mevcuttur. Pamuk, doğal selülozik bir liftir ve yenilenebilir bir kaynaktan elde edilmektedir. Doğada biyolojik olarak parçalanabilmektedir. Bu sebeple birçok tüketici, pamuğu çevre dostu bir hammadde olarak bilmektedir. Ancak gerçekte pamuk bitkileri, bazı mantar ve böcek türlerinin saldırısına karşı oldukça savunmasızdır. Pamuk, dünya çapında en fazla pestisit kullanılan tarım ürünüdür; bu pestisitler her yıl birçok insanın ölmesine ve sağlığının zarar görmesine neden olmaktadır. Ayrıca, pamuk ekimi, yerel halkın kendi gıdalarını yetiştirmesi için ihtiyaç duyduğu tarım arazilerinin çoğu bölümünü kaplamaktadır. Mekanik pamuk hasadını kolaylaştırmak amacıyla kullanılan kimyasal yaprak dökücüler ve herbisitler çevre ve insan sağlığı üzerinde ek bir yük oluşturmaktadır. Bu kimyasallar genellikle kumaşların bitim işlemlerinden sonra bile kalmakta ve giysilerin ömrü boyunca, yıkanma gibi işlemlerle serbest kalıp ekosisteme karışmaktadır [13]. Küresel ölçekte pamuk üretimi yıllık yaklaşık 4-5 milyon ton civarındadır. Atık pamuk lifleri, kullanıldıktan sonra bile geri dönüştürülüp yeniden kullanım alanı bulabilmektedir. Hazır giyim sektöründe de pamuk atıklarının büyük çoğunluğu geri dönüştürülmüş iplik olarak değerlendirilmektedir. Pamuk atıklarının kompozit malzeme üretiminde kullanımı, yenilenebilirlik, düşük

maliyet, çevre dostu ve sürdürülebilir yapı gibi avantajları sebebiyle artan araştırmaların odak noktası olmuştur [75].

Son yıllarda, daha çevre dostu koşullarda yetiştirilen ve doğal renkli pamuk ve organik pamuk olarak pazarlanan birkaç geleneksel olmayan pamuk türü geliştirilmiştir. Doğal mutasyonlar ile elde edilen çeşitli kahverengi ve yeşil tonlarında doğal renkli pamuklar, boyar madde kullanılmadan direkt renkli veya desenli kumaşlara dönüştürülebilmektedir. Ayrıca, doğal renkli pamuk bitkileri, geleneksel beyaz pamuk ile kıyaslandığında zararlılara ve hastalıklara karşı daha dirençlidir, böylece pestisit ve fungisit ihtiyacını azaltabilmekte veya tamamen ortadan kaldırabilmektedir.

3.1.1 Konvansiyonel Pamuk

Konvansiyonel pamuk, dünyada en yaygın yetiştirilen endüstriyel bitkilerden ve tekstil sektörünün temel hammaddelerinden biridir. Ancak, büyük miktarda enerji, su, gübre ve pestisit kullanımını gerektiren bir tarımsal süreçtir. Üretiminde çevresel sürdürülebilirliği tehdit eden çeşitli faktörler barındırmaktadır. Çevre dostu olmayan konvansiyonel pamuk, sentetik kimyasallar ile desteklenen üretim sürecine sahiptir. Bu süreçte herbisitler, pestisitler ve kimyasal gübreler, tarım arazilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kimyasallar ile toprak ve su kalitesi olumsuz etkilenmekte ve biyolojik çeşitlilik tehdit edilmektedir [76]. Konvansiyonel pamuk liflerinin kalitesi, kimyasal girdi kullanımı, tarımsal uygulamalar ve iklimsel koşullardan etkilenmektedir. Araştırmalarda, kimyasal işlem gören pamuk liflerinin daha yüksek mikroner değerleri ve daha kısa lif uzunluğu gösterdiği belirtilmiştir. Kimyasal müdahaleler sayesinde haşere kontrolü sağlanıyor olsa da lif kalitesinde homojenlik kaybına neden olabilmektedir [77]. Enerji tüketiminde, karbon ayak izini artıran enerji yoğun bir süreç olarak bilinmektedir. Liflerden iplik elde edilmesinde ve tekstil üretiminde kullanılan ısı ve buhar enerjisi, çoğunlukla fosil yakıtlar ile sağlanmaktadır. Cundubey ve Azgin (2024) tarafından yapılan çalışmada, konvansiyonel pamuk üretiminin denim kumaş üzerindeki çevresel etkileri incelenmiş olup asitlenme oranları ve küresel ısınmanın, bu süreçlerin etkisiyle olduğu ortaya çıkmıştır. Karbon ayak izinin de aynı doğrultuda, geri dönüştürülmüş pamuk gibi alternatiflere göre daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur [76]. Konvansiyonel pamuk üretiminin çevresel etkileri minimize etmek ve üretimdeki lif kalitesi tutarsızlığını azaltmak amacıyla daha az

kimyasal yoğun tekniklere yönelip hassas tarım yöntemlerini benimsemek etkili olabilmektedir.

3.1.2 Organik Pamuk

Organik pamuk, genetik mühendislik müdahalesi veya sentetik kimyasallar olmadan yetiştirilen bir pamuk türü olup çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahiptir. Bu pamuk türü, toprak sağlığını koruma, biyolojik çeşitliliği destekleme ve su kaynaklarını daha verimli kullanılması gibi konularda çeşitli avantajlar sunmaktadır [77]. Organik pamuk yetiştiriciliği, sentetik pestisit ve gübre kullanmaması nedeniyle toprağa daha az zarar vermektedir ve karbon ayak izini azaltabilmektedir. Ancak organik tarım verimliliği daha düşük olabilmekte ve daha yoğun emek gerektirebilmektedir. Ayrıca, organik pamuk üretimi, geleneksel üretim sürecine kıyasla daha yüksek verime sahiptir; yani daha az girdiyle daha fazla üretim sağlanır. Buna rağmen, organik pamuk yetiştiriciliği insan toksisitesi kategorilerinde daha yüksek çevresel yükler oluşturur. Bunun sebebi, toprağa daha fazla ağır metal salınımı yapılmasıdır [15].

2020/21 döneminde dünya genelinde organik pamuk yetiştirilmesine katkı sağlayan toplam ülke sayısı 21 olarak sabit kalmıştır. Myanmar, Tayland ve Senegal gibi ülkelerde yaşanan siyasi istikrarsızlık, sel felaketleri ve sertifikasyon sorunları nedeniyle organik pamuk üretimi durma noktasına gelmiştir. Buna karşın, Kazakistan ve İspanya ilk kez organik pamuk üretimine başlamış, Arjantin ise kaybettiği sertifikasyonunu kazanarak organik pamuk pazarına geri dönmüştür. Bu dönemde Türkiye, Kazakistan, Tanzanya ve Hindistan organik pamuk üretimindeki küresel artışın büyük bölümünü oluşturmuştur. 8 ülke dünya genelinde %97'lik kısmı oluşturmaktadır:

- Hindistan (%38)
- Türkiye (%24)
- Çin (%10)
- Kırgızistan (%9)
- Tanzanya (%6)
- Kazakistan (%4)
- Tacikistan (%4)

- Amerika Birleşik Devletleri (ABD) (%2)

Geri kalan 13 organik pamuk üreten ülkenin toplam payı ise %3 seviyesinde kalmıştır. Bu veriler, organik pamuk üretiminin bölgesel farklılıklar gösterdiğini ve belli başlı ülkelerin organik pamuk piyasasında belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Türkiye ve Hindistan gibi ülkeler sadece organik pamuk üretiminde değil, dönüşüm aşamasındaki pamuk üretiminde de kritik konumda yer almaktadır. Bu büyük paydaşlar, organik pamuk arzının artırılması ve daha sürdürülebilir bir tekstil endüstrisinin inşa edilmesi açısından kilit rol oynamaktadır [78].

Organik pamuk, doğayla uyumlu bir tarım sistemi kullanarak yetiştirilir, yani doğa ile ters düşmeyen bir bakış benimsemektedir. Organik tarım, yenilik, gelenek ve bilimi birleştirerek çevreye fayda sağlamaktadır. Organik tarım sistemleri, dışsal girdilerin çevresel zararlara yol açabileceği durumlar yerine, ekosistemlerin sağlığını ve biyolojik çeşitliliği korumaktadır. Organik uygulamalar, kısa vadeli verimlilik yerine uzun vadeli dayanıklılık ilkesine bağlı kalarak küresel tedarik zincirindeki paydaşları için de sürdürülebilir bir gelecek sağlamaya yardımcı olabilecektir. Organik tarım sadece doğal veya sürdürülebilir terimler altında değerlendirmeye alınmamalıdır. Organik tarımın temel ilkeleri yasal olarak denetlenmeye alınmaktadır. Yetiştiriciliği yapan çiftçiler, otoriteler tarafından belirlenen kriterlere uymaları hususunda denetlenmektedir [78]. Üretiminde zirai ilaç kullanımı büyük bir ciddiyetle engellenmektedir. ABD Ulusal Organik Programı (NOP) ve Avrupa Ekonomik Topluluğu'na (EEC) göre belirlenen kriterlere göre üretiminin yapılması beklenmektedir. Bu kriterler:

- Böcek ve mantar ilaçları
- Ot öldürücüleri
- Zirai ilaçlar
- Genetiği değiştirilmiş organizma tohumları
- Yaprak dökücü kimyasallar kullanılamaz.

Yukarıdaki kriterlere göre üretimi yapılmaya çalışıldığından pamuk hasadı daha zorludur. Bu sebeple, organik pamuk fiyatı daha yüksektir [54]. Pamuk tarladan çıktıktan sonra, aynı yasal korumalara tabi kalmamaktadır. Ancak, özel standart belirleme kuruluşları, organik pamuk zincirindeki takibi yapmak amacıyla gönüllü standartlar geliştirmiştir. En yaygın olanları Textile Exchange'in Organik İçerik

Standardı (OCS) ve Küresel Organik Tekstil Standardı (GOTS) olup, her iki standart da, Uluslararası Organik Tarım Hareketleri Federasyonu (IFOAM - Organics International) tarafından bilinen organik standartlara göre sertifikalandırılmış çiftliklerden gelen organik pamuk girdilerini kabul etmektedir. Bağımsız üçüncü taraf sertifikasyonu, organik pamuk durumunun doğrulanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Pamuk, doğadaki en çok kullanılan liflerden biridir, ancak geleneksel pamuk üretiminde ciddi çevresel etkiler bulunmaktadır. Küresel tarımda kullanılan pestisitlerin %35'i pamuk tarımı için harcanmaktadır ve yalnızca ABD'de 55 milyon pound pestisit kullanılmaktadır. Buna karşı, organik pamuk daha sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Organik pamuk ekosistem sağlığını korumakta, yerel kaynakları kullanarak ekonomiyi canlı kılmakta ve çiftçilere daha fazla prim sağlayarak sosyal fayda sağlamaktadır. Bu sistem, özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki küçük çiftçiler için büyük faydalar sağlar. Küçük çiftçiler, organik pamuk yetiştirerek, daha yüksek fiyatlardan satış yapabilmekte ve endüstrileşmiş ülkelerdeki büyük tarım şirketleriyle rekabet edebilmektedir. Bununla birlikte, organik pamuk tarımı çok fazla deneyim, özen ve bağlılık gerektirmektedir. Ayrıca, işleme aşamalarında aromatik çözücüler, formaldehit, azo boyalar ve klorlu ağartıcılar gibi zararlı kimyasallar kullanılmaz. Organik pamuk, kimyasal kalıntı içermeyen gıda üreterek gıda güvenliğini de artırmaktadır. Organik pamuk tarımının çeşitli avantajları olmasına rağmen, gelişimini zorlaştıran bazı engeller bulunmaktadır. Bunlardan biri verimdir. Organik pamuk verimi, geleneksel pamuktan daha düşüktür. Geleneksel pamuk çiftçileri, daha yüksek verim için büyüme hormonları ve kimyasal gübreler kullanabilmektedir ve organik tarıma geçişte tereddüt yaşayabilmektedirler. Organik pamuk yetiştiriciliği zaman alan, titiz bir süreçtir. Geleneksel pamuktan organik pamuğa geçiş süresi yaklaşık üç yıl sürebilmektedir. Bu süre zarfında çiftçiler organik primlerden yararlanamamakta ve endüstriyel yöntemlerle daha fazla ürün yetiştirme potansiyelini kaçırabilmektedir [79].

Organik pamuk, tekstil sektöründe sürdürülebilir ve çevresel özellikleriyle ekonomiye katkı sağlamakta, ekolojik dengenin ayakta kalmasına yardımcı olmakta ve dezavantajlarına rağmen doğru pazar stratejileri ile yeni fırsatlar

yaratmakta olan hammadde olarak tekstil dünyasının merkezinde yer alacağı düşünülmektedir.

3.1.3 Genetiği Değiştirilmiş Pamuk (Bt-Cotton)

Genetiği değiştirilmiş pamuk, genetik mühendisliği ile geliştirilmiş, *Bacillus thuringiensis* bakterisinden elde edilen genlerin pamuk bitkisine aktarılması yoluyla böcek zararlılarıyla mücadele etmek için direnç kazandırılmış bir pamuk çeşidi olarak tekstilde kullanılmaktadır. Böcek türlerine karşı gelmesiyle pestisit kullanımını azalmaktadır. Böylece, pestisitlerin biyolojik çeşitliliğe ve doğal kaynaklara verdiği zararları indirme konusunda desteklemektedir [80].

Genetiği değiştirilmiş pamuk, geleneksel pamuk türlerine kıyasla daha az kimyasal girdi gerektirdiğinden, su ve toprak kirliliğini önlemede yardımcıdır. Gudeta ve diğerleri (2023), Etiyopya'daki farklı iklim koşullarında genetiği değiştirilmiş pamuğun yüksek verim sağladığını ve zararlı böceklere karşı dirençli olduğunu tespit etmiştir [80]. Doğu Afrika'da yapılan başka bir araştırmada ise genetiği değiştirilmiş pamuğun, geleneksel pamuk üretimine kıyasla pestisit kullanımını %60 oranında azalttığı ve çevresel ayak izini düşürdüğü vurgulanmaktadır. Genetiği değiştirilmiş pamuk üretiminin yapıldığı bölgedeki sosyal ve ekonomik yapıyı da olumlu yönde etkilemiştir [81]. Çiftçilerin daha az iş gücüyle daha çok verim elde edebildiği ortaya konmaktadır. Aynı zamanda, ekonomik açıdan önemli avantajlara sahip olmasıyla, pestisit maliyetlerindeki azalma, diğer tarımsal işlemlerin de maliyetlerini düşürmektedir. Sabir ve diğerleri (2011), Pakistan'da Genetiği değiştirilmiş pamuk kullanan çiftçilerin az maliyetle yüksek verim elde ettiğini ve her ürün başına düşen maliyetin de o oranda azaldığını belirtmiştir. Bu da, çiftçilerin sürdürülebilir tarım yapması konusunda teşvik edici bir etken olarak söylenmektedir [82]. Enerji ve su verimliliği açısından geleneksel pamuk türlerine göre daha avantajlı olan genetiği değiştirilmiş pamuk hakkında, Rajpoot ve diğerleri (2021), ekim yerine transplantasyon yöntemiyle ekildiğinde su tüketiminde %60'a kadar bir azalma ve enerji tasarrufu sağladığını tespit etmiştir. Su kıtlığı yaşayan bölgelerde bu özellik, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bir alternatiftir. Aynı zamanda, genetiği değiştirilmiş pamuk üretiminde enerji tüketiminin azalması karbon ayak izini düşürmekte ve iklim değişikliğiyle mücadelede olumlu bir katkı sunmaktadır [83].

2019 yılında, böceklere karşı dirençli ve herbisitlere toleranslı genetik olarak değiştirilmiş pamuk, 25,7 milyon hektar alanda yetiştirilmiş olup dünya genelindeki pamuk alanının %79'unu tekabül etmektedir. 2021 ile 2026 arasında dünya pamuk talebinin yıllık %4,1 oranında bir artış yaşaması beklenmektedir [84]. Bu artış, gelişmekte olan ülkelerdeki nüfus artışı, şehirleşme ve artan gelir seviyeleri ile pamuk tekstil ürünlerine olan talebin artmasıyla ilişkilendirilmektedir.

3.1.4 Geri Dönüştürülmüş Pamuk

Tekstil endüstrisinde ortaya çıkan atık miktarının azaltılması ve döngüsel ekonomi desteklenmesi açısından geri dönüştürülmüş pamuk kritik bir malzemedir. Pamuk tekstil atıklarının geri dönüşümü, doğaya olan fazla baskıyı azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, 250 gramlık bir pamuk tişörtün üretimi süresince 450 g katı atık, 1,7 kg fosil yakıt ve 4 kg CO_2 salınımı gerçekleşmektedir. Geri dönüştürme süreci ile bu etkiler azaltılarak doğrudan kaynak tüketimi minimize edilmekte ve tekstil atıklarının depolama alanlarını doldurmasını önlenmektedir [85].

Geri dönüştürülmüş pamuğun potansiyel faydaları:

- Daha az atık alanı kullanımı: Sentetik lifler, çöplüklerde uzun süre bozulmadan kalırken, yünlü giysiler ayrışmakta ve metan gazı üreterek küresel ısınmaya sebep olmaktadır.
- Doğal kaynaklara yapılan baskının azalması
- Hammadde maliyetlerinin düşmesi
- Enerji tasarrufu ve kirlilik kontrolü

Zonatti ve arkadaşlarının (2015) yaptığı çalışmaya göre, geri dönüştürülmüş pamuk liflerinin termoset kompozitlerde takviye malzemesi olarak kullanım potansiyelini değerlendirmiş ve bu malzemenin mekanik performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kompozit malzemelerin Ayrı ayrı korudukları özellikler, birleştiğinde daha üstün niteliklere sahip yeni malzemeler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çekme testleri ile bu malzemelerin dayanım özellikleri değerlendirilmiş ve kompozitlerin mekanik dayanıklılığı, takviye oranına bağlı olarak artmıştır. Ayrıca araştırma, geri dönüştürülmüş liflerin moda ürünlerinde nasıl değerlendirilebileceği konusunda katma değerli ürün geliştirme fikri

sunmaktadır. Sadece teknik açıdan değil, aynı zamanda estetik potansiyelleri de incelenmiş ve geri dönüştürülmüş pamuklu aksesuarlar tasarlanmıştır [85].

Geri dönüştürülmüş pamuk, 2023 yılında yaklaşık 319.000 ton üretime ulaşmıştır. Bu miktar 24,4 milyon tonluk birincil pamuk üretimi ile karşılaştırıldığında toplam pamuk üretiminin %1'ine denk gelmektedir [2]. Döngüsel moda sistemlerinin geliştirilmesini destekleyen bir girişim olan Scaling Circularity Raporu'na göre, tekstil atıklarının daha verimli kullanılmasının büyük bir çevresel ve ekonomik değeri olduğunu ortaya koymuştur. Raporda, Reverse Resources araştırması, yalnızca Bangladeş'te bulunan hazır giyim ve kumaş fabrikalarında yıllık yaklaşık 330.000 ton %100 saf ön tüketici pamuk atığı üretildiğini, ancak bunun %5-7 arası bir oradan geri dönüşümünün yapıldığını göstermektedir [2].

3.2 Viskon ve Selüloz Tabanlı Lifler

İnsanlık tarihinde en eski üretim alanlarından birine sahip olan tekstil endüstrisi, doğal kaynaklara dayalı üretim süreçleri ile birçok çeşitte lif seçeneğine sahiptir. Özellikle ağaç ve pamuk kaynaklı selülozdan elde edilen viskon ve lyocell gibi lifler, işlevsellik ve konfor sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, bu liflerin üretiminde çevresel etkiler sorunlar barındırmaktadır. Viskon lifi, üretim aşamalarında kimyasal işlem gerektirmesi nedeniyle su tüketimi, kimyasal atık oluşumu ve sera gazı emisyonlarına yol açmakta olup, lyocell, daha çevre dostu olmasıyla alternatifler arasındadır. Her iki lif türü de biyobozunur olma özelliğine sahiptir. Ancak, üretim süreçlerinin optimizasyonu ve daha temiz teknolojilere geçiş, tekstil endüstrisinin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol oynamaktadır [86].

Viskon lifi, selülozun sodyum hidroksit (NaOH) ve karbon disülfür (CS_2) ile tepkimeye sokulmasıyla üretilirken, lyocell, viskondan farklı olarak, N-metilmorfolin-N-oksit (NMMO) kullanılarak üretilmektedir. Viskon üretiminde, toksik yan ürünler açığa daha çok çıkmaktadır. Örneğin, bir ton viskon lifi üretimi yapılırken 300-600 ton zehirli atık ve atık su oluşumu gözlemlenlenmektedir. Ayrıca, karbon disülfürün geri kazanım oranı çok düşüktür. Yüksek mekanik dayanıma sahip olup daha uzun ömürlü kullanım şansı sunan lyocell liflerinde ise selüloz herhangi bir kimyasal değişim geçirmeden çözünmekte ve solvent yaklaşık %98'lik bir oranda geri kazanılabilmektedir [86].

Bambu elyafı ise bambu bitkisinin selülozunun işlenmesi ile üretimi yapılmaktadır. Doğal olması ve hızlı büyümesiyle bilinen bambu bitkisi, düşük su ve kimyasal gereksinimleri ile de çevre dostu seçenek olarak tekstil endüstirisinde kullanımı yapılmaktadır. Ancak, viskonda olduğu gibi kimyasal çözücüler kullanıldığı taktirde çevresel risk oluşturabilmektedir. Viskondan daha dayanıklı olan modal ise kayın ağacından elde edilmektedir. Üretimde kullanılan kimyasalların geri kazanımı daha yüksektir.

3.2.1 Viskon (Rayon)

Viskon (rayon), bitkisel selüloz kaynaklarından elde edilen yarı sentetik lif olarak tekstil endüstrisinde geniş çapta bir kullanım alanı bulmaktadır. Yumuşak dokusu ve doğal parlaklığı ile konfor sağlamakta olan viskon, çevre dostu bir seçenek gibi görünmektedir. Ancak, üretim süreci birçok çevresel zorluk içermektedir. Viskon üretiminde, selülozun çözünebilir hale getirilmesi için karbon disülfür, sodyum hidroksit ve sülfürik asit gibi kimyasal kullanımı söz konusudur. Bu kimyasallar çevresel toksisiteye ve iş sağlığı sorunlarına yol açabilmektedir. Özellikle karbon disülfürün atmosfere salınımı, çevresel kirliliğin yanı sıra fabrika çalışanlarının sağlığı üzerinde de olumsuz etkiler yaratmaktadır [87]. Viskon üretiminde su tüketimi de önemli bir çevresel problem olarak öne çıkmaktadır. Viskon lifi üretmek için kullanılan su miktarının, özellikle su kaynakları sınırlı olan bölgelerde ciddi bir çevresel baskı oluşturduğu ifade edilmektedir. Viskon üretim sürecindeki su tüketiminin yanı sıra, oluşan atıksular da yüksek seviyede toplam organik karbon (TOC) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) içermektedir. Bu da su kaynaklarına salınmadan önce etkili bir şekilde arıtılmasını gerektirir [87]. Viskon üretim sürecinde ayrıca çinko sülfat gibi kimyasallar da kullanılmaktadır. Çinko, üretim döngüsünde geri dönüştürülebilir bir element olarak, verimlilik sağlamak amacıyla tekrar kullanılabilir. Çinko iyonlarının arıtılması ve geri dönüşümü, viskon üretim tesislerinde çevre dostu uygulamaları destekleyen bir başka sürdürülebilirlik yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır. Bu süreç, çevresel yükü azaltırken aynı zamanda kaynakların verimli kullanılmasını sağlamaktadır.

Viskon üretiminin çevre üzerindeki etkilerini azaltmak, sürdürülebilirlik için büyük önem taşır. Atıksu arıtma ve kimyasal geri dönüşüm gibi önlemler, viskonun hem sürdürülebilir bir tekstil lifi olarak kabul edilmesini sağlamakta hem de üretim tesislerinin çevre dostu operasyonlarına daha geniş bir katkıda bulunmaktadır.

3.2.2 Lyocell ve Tencel

Tencelin jenerik adı Lyocell olarak bilinmektedir [88]. Lyocellin lif piyasasında daha çok ön plana çıkmasının nedeni, konvansiyonel viskon üretim sürecine oranla daha az kirletici bir iplik çekim sürecine sahip olmasından kaynaklanmaktadır [89].

Lyocell, yenilenebilir bir selüloz elyafı türüdür ve bitkilerden elde edilmektedir. Sürdürülebilir ve çevre dostu olarak birçok üstün özelliğe sahiptir [90]. Bitki kaynaklı olması onun, doğal kaynakların tükenmesini önlemesi anlamı taşımaktadır. Üretim sürecinde N-metilmorfolin-N-oksit (NMMO) solventi kullanılmakta ve bu solvent, %99,5 geri dönüşüm oranına sahiptir. Böylelikle, üretim sürecinde kimyasal kullanımını kısıtlanmakta ve solvent döngüsünün kapalı sistemde sürdürülebilirliği sağlanmaktadır [90]. Lifin kesiti yuvarlak, yüzeyi pürüzsüz ve ham haldeyken yüksek parlaklık sunmaktadır. [91] Ayrıca, biyolojik olarak parçalanabilir bir yapıya sahiptir. Bu özellik onun mikroplastik kirlilik oluşturmadan doğada yok olmasına olanak tanımakta ve uzun vadede olumsuz çevresel etkilere en aza indirmektedir [90].

Tencelin kesiti dairesel ve yüzeyi pürüzsüzdür. Bunun nedeni, iplik çekim sürecinde selülozik liflerin solvent tarafından hızlı ve derin bir şekilde nüfuz edilmesi ve bu durumun tutarlı bir koagülasyon ile sonuçlanmasıdır. Tencelin özel iplik çekim yöntemi, konvansiyonel viskon liflerden farklı olarak, lifin selüloz birimlerinin oldukça uzun ve düzenli kristal yapı oluşturmasına neden olmaktadır. Bu kristaller, lifin boyuna eksenine son derece güçlü bir şekilde hizalanmıştır [90].

3.2.3 Bambu Elyafı

Bambu elyafı, çevresel sürdürülebilirliği destekleme gibi özelliği sebebiyle tekstil sektöründe giderek daha çok ilgi gören bir kaynak olarak bilinmektedir. Bambu bitkisi, daha düşük su ihtiyacı, hızlı büyüme kapasitesi ve daha az tarımsal kimyasal gereksinimi ile yetişebilmesiyle çevre dostu olarak kabul edilmektedir. Özellikle, pamuk gibi çok su tüketen bitkilerle karşılaştırma yapıldığında, bambunun çok az su tükettiği ve doğal kaynak verimli kullanmadaki pozitif özellikleri dikkat çekmektedir. Bu özellikleri sebebiyle bambu tekstil endüstrisinde tercih edilen bir alternatif haline gelmiştir [92].

Bambu düşük kaynak gereksinimi olan ve hızlı büyüyen bir bitki olarak yenilenebilir kaynak özelliği taşımaktadır [93]. Bunların yanında, yüksek karbon

yakalama kapasitesi de mevcuttur. Karbondioksiti yıl boyunca emen bambu bitkisi, iklim değişikliği ile de savaşmaktadır. Ancak bu avantajlarının yanında bambu viskonunun kimyasal işlemler ile üretilmesi çevresel etki konusunda tartışma yaratmaktadır. Üretimi sırasında kullanılan kimyasal maddeler çevreye zararlıdır ve bu da bambu lifinin çevre dostu özelliğine hasar vermektedir [94]. Sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda kimyasal madde kullanımı en aza indirilmeli ve mekanik işleme yöntemleri tercih edilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde bambunun doğal avantajları muhafaza edilmekte ve daha çevreci bir üretim modeline katkı sağlayabilmektedir [92].



Şekil 3.1 Bambu lifi [95]

3.2.4 Modal

Modal lifi, kayın ağacı selülozundan elde edilmektedir ve rejeneratif lifler arasında yer almaktadır. Yumuşaklık, yüksek mukavemet ve nem yönetimi gibi özellikleri ile tekstil endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır [96]. Genellikle viskon, bambu ve pamuk gibi lif türleri ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Bu karışımdan sonraki lifler, genellikle daha yüksek elastikiyet ve mukavemet göstermektedir. Yapılan araştırmalarda, %100 modal liflerin kullanıldığı kumaşların, %100 pamuk veya viskon kumaşlara göre daha iyi konfor özelliklerine sahip olduğu bulunmuştur [97]. Ayrıca, %50 modal-%50 viskon kullanılarak oluşturulan kumaşların en yüksek hava geçirgenliği ve nem tutuculuğu bulunmuştur [98]. Üretiminde çevre dostu çözücüler kullanılmaktadır ve yaş çekim yöntemi ile iplik haline getirilmektedir. Üretim sürecinde kullanılan çözücülerin çoğundan fazlasının geri dönüşümü yapılabilmektedir. Bu sayede çevresel sürdürülebilirlik konusunda yardımcı olmaktadır [99]. Ayrıca, konvansiyonel pamuk üretimi ile karşılaştırıldığında daha az kimyasal madde ve su kullanımı dikkat çekmektedir. Kayın ağaçlarının da orman yönetimi kapsamında yetiştirilmesi, bu lifleri daha çevreci yapmaktadır [100].

3.3 Kenevir ve Keten

Kenevir (*Cannabis sativa L.*) ve keten (*Linum usitatissimum L.*) lifleri, düşük çevresel etki ve sürdürülebilirlik gibi avantajları ile tekstil endüstrisinin ilgi çekici doğal liflerinden olmaya devam etmektedir. Bu iki lif türü, çevre dostu özellikleri ve dayanıklı yapıları sayesinde lif takviyeli kompozitler, teknik tekstiller ve giyim tekstilleri gibi çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. Kenevir ve ketenin düşük su, kimyasal ve pestisit gereksinimleri bulunmaktadır. Her iki lif türü de geleneksel biyolojik çürütme veya sıcak su çürütme gibi yöntemler ile işlenmektedir. Bu yöntemlerde enerji yoğunluğu farklılık göstermekte olup biyolojik çürütme yönteminde daha düşük enerji tüketimi bulunmaktadır. Kenevir üretimi esnasında azot sızıntısının neden olduğu, çevresel zorluklardan ötrofikasyon olsa da genel olarak kenevir, diğer yıl bazlı bitkilere kıyasla daha düşük çevresel etkisi bulunmaktadır [101].

Kenevir ve keten liflerinin sahip olduğu sürdürülebilir tekstil üretimindeki potansiyeli, biyolojik olarak parçalanabilir olması, liflerin tarımsal girdiye olan düşük gereksinimleri ve yüksek mekanik dayanıklılıkları ile desteklenmektedir. Enerji verimliliği sağlayan teknolojilerin kullanılması, çevresel etkileri minimize etmesi ve karbon ayak izi hedeflerini gerçekleştirmesi açısından önemli bir etkiye sahiptir. Bu gibi özellikler ile kenevir ve keten, çevresel sürdürülebilirlik ve çevre dostu olma doğrultusunda tekstilde önemli bir yere sahiptir.

3.3.1 Kenevir

Kenevir bitkisi, *Cannabaceae* familyasına ait bir tek yıllık bir bitkidir. Antik çağlardan beri lif üretimi için yetiştirilmiş olsa da 20. yüzyılın başlarında ekimi ciddi bir şekilde azalmıştır [102]. Kenevir bitkisinin uyuşturucu amaçlı kötüye kullanımının ekimini azaltmasıyla tekstilde kullanım da kenevirden uzaklaşılmasının nedenlerinden olmuştur. Ancak tek sebep bununla sınırlı kalmamakta; aynı döneme denk gelen pamukla ilgili teknolojilerin gelişimi de yolu açmıştır. Pamuğun işlenmesi çeşitli teknikler ile kolaylaşmış, sentetik liflerin de pazara girmesiyle kenevir lifi geri planda kalmıştır [103].

Keten üretimi:

- Ekin yetiştirme
- Keten kırma (scutching)

- Eğirme

aşamalarından oluşmaktadır. Genelde çiy ile keten kırma (dew retting) yöntemiyle elde edilmekte olup, biyolojik keten kırma (bio-retting) ve su ile keten kırma (water retting) gibi yöntemleri de bulunmaktadır. Su ile olan yöntemin kullanılması yüksek su tüketimi açısından olumsuz çevresel etkiye sahiptir [101].

2023 yılında dünya genelinde yaklaşık 0,2 milyon ton lif keneviri üretildiği tahmin edilmektedir. Bu miktar, pamuk dışı bitkisel lif pazarının yaklaşık %4'ünü ve küresel lif pazarının yaklaşık %0,2'sini oluşturmaktadır. FAOSTAT verilerine göre, 2023 yılında 20 ülke lif keneviri üretmiştir: Avustralya, Avusturya, Şili, Çin, Çekya, Kuzey Kore, Fransa, Yunanistan, İtalya, Japonya, Litvanya, Hollanda, Güney Kore, Polonya, Romanya, Rusya, İspanya, Türkiye, Ukrayna ve Amerika Birleşik Devletleri. 2023 yılında küresel kenevir lifi üretiminin neredeyse yarısını Fransa gerçekleştirirken, onu Çin, Kuzey Kore, Hollanda, Avustralya ve ABD takip etmiştir [2].

LCA değerlendirmeleri, ketenin çevresel etkilerinin pestisit kullanımı, su ve enerji tüketimi gibi faktörlere bağlı olduğunu göstermektedir. Keten üretiminde pestisit kullanımı düşük olsa da toprak kullanımı açısından optimizasyon gerekmektedir. Doğada biyolojik olarak parçalanabilir oluşu, geri dönüşümünün yapılması ve toprak yapısını iyileştiren bir ekim sistemiyle birleştirildiğinde sürdürülebilir tarım uygulamalarına katkı sağlaması ile çevrecidir.

3.3.2 Keten

Keten (*Linum usitatissimum*), nefes alabilirliği, yüksek mukavemeti ve çevre dostu gibi özellikleri ile tekstil endüstrisinde giderek daha fazla tercih edilmekte olan doğal bir liftir. Düşük su tüketimi ve kimyasal ihtiyacı bulunmaktadır. Avrupa'da pamuk yetiştiriciliğinin sınırlı olması sebebiyle, keten ve diğer bitkisel liflerin önemini artırmaktadır. Keten üretimi, ekin yetiştirme, keten kırma (scutching) ve eğirme aşamalarından oluşmaktadır [101]. Keten kumaşlar yüksek nem emiciliğine sahiptir ve yazlık giysilerde sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, ketenin uzun lifleri yüksek mukavemet sağlamakta, kısa lifleri ise kompozit ve kâğıt malzemelerde değerlendirilebilmektedir. Keten, ılıman iklimlerde yetişmekte ve günümüzde Kanada, Batı ve Doğu Avrupa, ABD ve Rusya'da yaygın olarak üretilmektedir [104].

Keten içeren kumaşlar, çok defa yıkansa bile lif yapısında bozulma oluşmamakta, aksine daha yumuşak hale gelmektedir. Bu sayede uzun süre giyilebilmektedir. Bu da atık oluşumunu azaltmada katkı sağlamaktadır. Keten liflerinin hızlı su emme özelliği, özellikle havlu ve mutfak tekstili üretiminde avantaj sağlamaktadır. Biyobozunur olması ve yüksek mukavemeti, keteni çevre dostu bir alternatif haline getirmektedir. Geleneksel pamuk üretiminin çevresel etkileri göz önüne alındığında, ketenin yaygınlaştırılması sürdürülebilir tekstil üretimi açısından önemli bir adım olacaktır [104].

3.3.3 Muz Lifi

Muz bitkisinin saplarından elde edilen ve doğal bir lif türü olan muz lifi, tekstil endüstrisinde çevre dostu olarak kullanılmaktadır. Muz lifi, yüksek nefes alabilirlik, hızlı emicilik ve hızlı kuruma özellikleri gibi pozitif yönleri mevcuttur. Sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Bu lifin üretimi esnasında kimyasal ve gübre kullanımının azaltılması ve hasadı sonrası saplarının atık dışında kullanılması çevreye zararının minimum düzeye indirilmesini sağlamaktadır [105].

Muz lifi üretiminde enzimatik "degumming" yöntemleri kullanılmaktadır. Bu da geleneksel kimyasal yöntemler ile karşılaştırma yapıldığında daha az atık su ve enerji tüketimi oluşmasını sağlar. Bunun yanında biyolojik olarak parçalanabilir bir yapıya sahip oluşuyla da geleneksel petrokimya bazlı malzemeler ile karşılaştırıldığında onu, çevresel açıdan avantajlı alternatif haline getirmektedir. Hafifliği ve dayanıklılığı da bu avantajlara örnek olarak gösterilmektedir [106]. Düşük su ve karbon ayak izine sahip oluşu ile pamuktan daha düşük çevresel etkiye sahiptir [107]. Ancak şu ana kadar yeterince ilgi görmemiş bir lif türüdür.



Şekil 3.2 Muz lifi [108]

3.4 Polyester

Polyester, “ya doğal veya diğer lifler ile karıştırılarak kullanılan ya da tek başına kullanımı olan en yaygın insan yapımı sentetik malzeme” olarak bilinmektedir [17]. 1940'larda icat edilmiştir ve kısa sürede tekstil endüstrisinin en geniş kullanım alanına sahip sentetik lifi haline gelmiştir. İlk olarak yenilikçi bir materyal olarak kabul edilmiş, düşük maliyet ve hızlı üretim süreçleri gibi avantajlarıyla tekstil endüstrisinde devrim yaratmıştır. 1950'ler ve 1960'larda "plastic fantastic" çağıyla birlikte çok yönlülüğü ve dayanıklılığı sayesinde büyük bir popülerlik kazanıp, 1970'lerde polyester, kalitesiz ve ucuz bir malzeme olarak itibar kaybına uğramıştır. 1980'lerde Japon tasarımcılar sayesinde, avangart kullanımları ve mikro fiber teknolojisinin geliştirilmesi ile polyester, itibarını yeniden kazanmıştır [109].

Günümüzde polyester, tekstil üretiminde %54'lük bir paya sahiptir ve 2021 yılında dünya genelinde üretilen 113 milyon ton lifin 61 milyon tonu polyesterden oluşmaktadır [110]. Yıllık üretim hacmi 2023 itibarıyla yaklaşık 71 milyon tona ulaşmış ve 2022'deki 63 milyon tona kıyasla önemli bir artış göstermiştir. Bu üretim hacmi, polyesterin 2023 yılında küresel lif üretimindeki pazar payını yaklaşık %57'ye çıkarmıştır. Polyesterin bu yaygınlığı, dayanıklılığı, düşük maliyeti, işlenebilirliği ve geniş uygulama alanlarından kaynaklanmaktadır [2].

Polyester üretimi, petrol başta olmak üzere yenilenemeyen kaynakların kullanımına ve enerji yoğun süreçlere bağlıdır. Üretimde ham petrol çıkarılmakta ve rafine edilmektedir. Sonrasında PET (polietilen tereftalat) ve diğer endüstriyel kullanımlar için temel yapı taşları üretilmektedir. Bu süreç boyunca yüksek enerji tüketimi yanında fosil yakıtlara bağlılık da söz konusudur. Bu yüzden çevresel etkiler göz önüne alındığında büyük bir endişe yaratmaktadır [111].

Polyesterin çevreye verdiği zararlar, hammadde işlemesinden başlayarak üretim sürecine gelene kadar çeşitli aşamada kendini göstermektedir. Bu malzeme mikroplastik kirliliğe yol açmakta ve biyolojik olarak parçalanamamaktadır [10]. Yenilenemez bir kaynaktır. Ayrıca, kullanım ve yıkama sırasında mikro lifler bırakarak sucul ekosistemlere zarar verebilmektedir [112]. CO_2 emisyonlarından kaynaklanan küresel ısınma üzerindeki etkisi en yüksek olan liftir ve aynı zamanda yüksek enerji talebi gerektirmektedir [74]. Bu gibi etkiler ile polyester, sürdürülebilirlik açısından önemli ve ciddi sorunları beraberinde getirmektedir.

Dayanıklılık ve esneklik gibi olumlu özellikleri olan polyester, uygun maliyetiyle de tekstil endüstrisinin birçok ürününde kullanılmaktadır [66]. Ancak geleneksel polyester üretiminin oluşturduğu yüksek enerji ve su tüketimi, mikroplastik kirliliği ve ham petrolden üretilmesi gibi çevreye verdiği zararlar ve sürdürülebilirlik karşıtı olması dolayısıyla farklı alternatiflerine yönelinmiştir: geri dönüştürülmüş polyester ve biyobozunur polyester. Bu olumsuz etkileri göz önüne alınarak geri dönüştürülmüş polyester, doğal kaynakların korunması ve döngüsel ekonomi çabaları ile giderek daha fazla önem kazanmaktadır [10].

Polyesterin çevresel etkilerini azaltmak için sürdürülebilir üretim yaklaşımlarını dahil etmek önemlidir. Biyolojik olarak parçalanabilir polyesterlerin geliştirilmesi ve kapalı döngü geri dönüşüm sistemlerinin teşvik edilmesi ve enerji ve su tüketimini azaltan üretim tekniklerinin benimsenmesi tekstil endüstrisinin çevresel ayak izini azaltabilmektedir. Ayrıca, üretici sorumluluk projeleri ve tüketici bilinçlendirme kampanyaları polyesterin çevresel etkilerini hafifletmede kritik bir rol oynayabilmektedir [113].

3.4.1 Konvansiyonel Polyester

Konvansiyonel polyester, tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve geleneksel üretim yöntemi ile üretilen bir polyester türüdür. Düşük maliyeti ve yüksek dayanıklılığı sayesinde popülerlik kazanmıştır. Ancak doğada yüzyıllarca çözünememektedir. Ayrıca üretiminde fosil yakıtlara bağlılığı söz konusu olduğu için çevresel sürdürülebilirlik açısından olumsuz eleştirilere maruz kalmaktadır [66]. Üretim sürecinde karbon emisyonu ve yüksek enerji tüketimi ile ekosisteme verilen büyük zararı ile, kimyasal işlem aşamaları ve petrol kaynaklı hammaddelerin yoğun olarak kullanımı konvansiyonel polyesterin karbon ayak izini oldukça artırmaktadır [114]. Dünya genelinde konvansiyonel polyesterin ürettiği çevresel ayak izi, tekstil sektörünün toplam karbon emisyonlarının büyük bir bölümünü oluşturmaktadır [2]. Üretim aşamalarında kullanılan katkı maddeleri ve kimyasallar toprak sağlığına ve su kaynaklarına ciddi zararlar vermektedir. Mikroplastik lifler aşınma ve yıkama ile çevreye karışmakta ve su ekosistemlerinde birikerek su ekosistemini, oradaki canlıların biyolojik çeşitliliğini etkilemektedir [10].

Konvansiyonel polyester üretimi için gereken emisyon ve enerji miktarının, doğal lif üretimine kıyasla daha fazla olduğu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından bu durumun tehlike oluşturduğu belirtilmektedir [115]. Mikroplastik kirliliği yalnızca sucul ortamlar üzerinde değil, aynı zamanda solunum yolu ile insan bedeni ve sağlığı için tehdit oluşturduğu bilinmektedir.

Konvansiyonel polyesterin çevresel zararları ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak için sektörde yenilikçe çözümler geliştirmeye ihtiyaç bulunmaktadır. Biyobozunur ve geri dönüştürülmüş polyester (rPET) gibi alternatiflerin fazlalaşması ve enerji verimliliği odaklı üretim teknolojilerinin yaygınlaşması gibi çözümler sunulabilmektedir. Ancak teknik sınırlamalar ve yenilikçi malzemelerin üretim maliyetleri konvansiyonel polyesterin yerini almayı zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte, döngüsel ekonomi modellerinin benimsenmesi ve çevresel farkındalığı artması geri dönüşüm oranının yükselmesini teşvik etmektedir [117].

3.4.2 Geri Dönüştürülmüş Polyester (rPET)

Geri dönüştürülmüş polyester, daha sürdürülebilir bir hammadde olarak öne çıkmaktadır. Bunun sebebi, geri dönüştürülmüş polyester kullanımı doğal kaynakları korumakta, üretim sürecinde enerji tasarrufu sağlamakta ve daha düşük sera gazı emisyonları ile kimyasal madde kullanımına yol açmaktadır [118]. Bu polyester türü, çeşitli post-tüketici ve ön-tüketici plastik atıklardan üretilebilmektedir. Kaynakları şunlardır:

Post-Tüketici Plastik Atıklar:

- Ambalaj atıkları
- Okyanus atıkları
- Kullanılmış ve atılmış polyester tekstiller

Ön-Tüketici İşlem Kalıntıları:

- Tekstil üretiminden kalan diğer polyester kalıntıları
- Üretim sürecinden kaynaklanan kumaş artıkları

Yalnızca şişe endüstrisinde değil, ambalaj endüstrisi ve diğer sektörlerde de post-tüketici plastik şişelere olan talep giderek artmaktadır. Bu durum, rekabetin yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Bu lif türü, tekstil endüstrisinin gelecekte yaşanacak hammadde tedarikini güvence altına almak amacıyla tekstil-tekstil geri dönüşüm stratejisi önem taşımaktadır. Bu geri dönüşüm stratejisi, atık tekstil ürünlerinden hammadde eldesi ile üretim süreçlerinde kullanılmasını sağlamaktadır. Böylece döngüsel ekonomi yaklaşımını desteklenmekte, tekstil endüstrisi çevresel ayak izi azalmakta ve kaynaklar üzerindeki baskı kalkmaktadır.

Geri dönüştürülmüş polyester, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda geliştirilmiş polyesterin alternatif türüdür. Bu tür geri dönüştürülmüş kaynaklar, atık miktarını azaltırken çevresel sürdürülebilirliği artırmada önemli rol oynamaktadır [2].

Bu lif türünde kullanılan kimyasal ve mekanik yöntemler, konvansiyonel polyester üretimine nazaran daha düşük su ve enerji tüketimi gerektirmektedir. Kimyasal geri dönüşüm sürecinde, özellikle malzeme saflığını artırmak amacıyla PET polimerlerinin temel bileşenlerine ayrıştırılması ve yeniden sentezlenmesi ile

yapılmaktadır. Mekanik geri dönüşüm süreci ise PET şişelerin yıkanması, parçalanması ve ardından eritilerek iplik haline gelmesiyle tamamlanmaktadır [66].

Küresel ölçek incelendiğinde, geri dönüştürülmüş polyester lif üretimi, 2022 yılında yaklaşık 8,6 milyon ton olup, 2023 yılında yaklaşık 8,9 milyon tona yükselmiştir. Ancak, saf polyester üretimindeki artış sebebiyle geri dönüştürülmüş polyesterin toplam pazar payında bir düşüş yaşanmıştır. 2022 yılında küresel polyester üretiminin yaklaşık %13,6'sını oluşturan geri dönüştürülmüş polyesterin payı, 2023 yılında yaklaşık %12,5'e gerilemiştir [2].

Geri dönüştürülmüş polyesterden üretilen kumaş, konvansiyonel polyester ile karşılaştırıldığında fiziksel dayanıklılık yönünden benzer özellikler taşımaktadır [119]. Ancak daha düşük esneme eğilimi ve çekme mukavemeti gibi sınırlamalar bulunmaktadır [120]. Ayrıca aşındırma ve yıkama işlemleri sırasında da mikroplastik yayma potansiyeline sahip olması olumsuz özellikleri arasındadır. Buna ek olarak, piyasada yaygın olmasına rağmen çeşitli üretim süreçlerine sahip olması kalite farklılığına yol açarak daha geniş çapta yer edinmesine engel olmaktadır.

Sonuç olarak, tekstil endüstrisinin sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi hedeflerini destekleme noktasında geri dönüştürülmüş polyester, uygun bir alternatif olarak görülmektedir. Hem ekosistem sağlığı hem de kaynak verimliliği konusunda geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımının yaygınlaşması önemli katkılar sağlamaktadır. Ancak beraberinde getirdiği diğer çevresel prablemlerin iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

3.4.3 Biyobozunur Polyester

Doğada bazı çevresel koşullar altında mikroorganizmalar tarafından parçalanabilen bir polimer türü olan biyobozunur polyester, sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunmaktadır. Geleneksel polyester gibi petrol bazlarından üretilebilmesine rağmen, biyobozunurluk özelliklerine sahip olması nedeniyle doğaya daha az olumsuz etki bırakmaktadır [119]. Bu polyester türü, geleneksel polyesterin çevreye verdiği zararı azaltmayı hedeflemektedir. Ayrıştırma sürecinde kullanılan NADES çözücüler ile enerji tasarrufu sağlanmaktadır [121]. Üretim aşamasında kullanılan maddeler, geleneksel polyesterde olan fosil yakıta ihtiyaç duymadığı için karbon ayak izi azaltmada önemli bir etkendir. Birtakım çalışmalar, katkı maddelerinin

sınırlı kullanılması ile toprak ve su kirliliği azaltmada etkili olduğunu göstermiştir [66].

Uygun çevresel koşullar ile biyobozunur polyester, zamanla parçalanmakta ve mikroplastik kirliliğin azalmasına katkı sağlamaktadır. Bu sayede kullanım ömürleri boyunca biyolojik çeşitliliğe daha az zarar vermektedir. Ancak doğal şartlarda parçalanabilmesi için uygun koşulların olması gerekmektedir. Tekstil endüstrisi için çevre dostu seçenek olarak kabul edilen biyobozunur polyester, teknik sınırlamalar ve yüksek üretim maliyetleri nedeniyle geniş çapta uygulama alanı bulması halen sınırlı kalmaktadır. Etkinliğinin optimize etmek amacıyla ileri teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Esneklik ve dayanıklılık açısından bakıldığında, konvansiyonel polyester ile aynı performansı göstermemektedir. Bunun sebebi üretimde yaşanan zorluklardan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, biyobozunur polyester çevre dostu olarak endüstride geniş yer bulabilecek olmasına rağmen, teknik zorlukların üstesinden gelinmesi ve üretim tekniklerinin modern hale getirilmesi gerekliliğini göstermektedir [10].

3.5 Naylon

Naylon, 1935 yılında geliştirilmiş ve %100 insan yapımı olan ilk sentetik lif olmuştur. Bu lif sayesinde yıkanabilir ve kolay bakım gerektiren kumaşlar üretilmiştir. Dayanıklılık, ütüleme sıcaklığına direnç, uzama ve en önemlisi güneş ışığına karşı direnç açısından tüketiciler için çeşitli özellikler sunmaktadır [122]. Naylon, en çok kullanılan ikinci sentetik lif olarak bilinmekte ve 2023 senesinde 6,7 milyon ton üretim ile lif pazarının %5'lik kısmında yer almaktadır. COVID-19 etkileri sebebiyle 2020'de hafif bir düşüş yaşasa da naylon üretimi, son beş yılda sürekli artış göstermiştir [109]. Geleneksel sentetik lif olarak pazarda bulunan naylonun üretiminde fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Ayrıca, naylon poliamid grubunu temsil eden önemli bir terimdir. Poliamidler, Naylon XY ve Naylon Z olarak ikiye ayrılmaktadır. Naylon 6 (Naylon Z tipi) ve Naylon 66 (Naylon XY tipi), en çok üretilen iki poliamid türüdür. Bu malzemeler, giyim, halatlar, halılar, lastik kordları ve çok çeşitli teknik tekstil uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Naylon liflerin özellikleri arasında: iyi elastik geri kazanım, üstün aşınma direnci, çoğu kimyasala karşı direnç, yüksek çekme mukavemeti ve lifin kopması için yüksek enerji gereksinimi bulunmaktadır [123].

3.5.1 Geri Dönüştürülmüş Naylon

Geri dönüştürülmüş naylon (poliamid), konvansiyonel naylona kıyasla daha ekonomik ve sürdürülebilir bir alternatif olarak üretilmektedir. Hammadde maliyetleri düşürülerek, enerji tüketimi ve sera gazı etkileri de en aza indirilmeye çalışmaktadır. Geri dönüştürülmüş naylon lifi pazarı genişlemekte, ancak yavaş bir hızda ilerlemektedir. 2023 yılı verilerine göre dünya genelinde yaklaşık 0,1 milyon ton geri dönüştürülmüş naylon üretilmiştir. Hammadde kalitesi, teknik sorunlar ve bulunabilmeye ilişkin zorluklar ile yüksek yatırım maliyetleri sebebiyle pazar payında düşük kalmakta ve toplam naylon lif üretiminin sadece %2'lik bir kısmını oluşturmaktadır [109].

Geri dönüştürülmüş naylon (poliamid) üretiminde, ön tüketim veya son tüketim atıkları kullanılmaktadır.

- Ön tüketim atıkları şunları içerebilmektedir:
    - Üretim artıkları
    - Sert poliamid atıkları
    - Kumaş kesim fazlaları
- Son tüketim poliamidi ise şu tür malzemelerden elde edilmektedir:
    - Kullanılmış halılar
    - Atılmış balık ağları
    - Diğer eski tekstil ürünleri

Geri dönüşüm süreci, kullanılan teknolojiye bağlı olarak mekanik veya kimyasal olabilmektedir. Mekanik geri dönüşümde atık naylon fiziksel olarak parçalanmakta, eritilmekte ve yeniden iplik halini almaktadır. Kimyasal geri dönüşümde ise, kimyasal işlemler kullanılarak ayrıştırma yapılmakta, saflaştırılarak yeniden sentezlenmektedir. Her iki yöntem ile de daha sürdürülebilir ve atık miktarını azaltmaya yönelik işlemler yapılmaktadır [109].

3.5.2 Biyobozunur Naylon

Artan sera gazı emisyonları ve azalmakta olan fosil yakıtlar ile sürdürülebilir malzemelere olan ihtiyaç artmaktadır. Bu açıdan, biyobazlı polimer üretimi için yenilenebilir biyokütle ile çalışmak büyük önem taşımaktadır. Bu sayede fosil

yakıtlara olan bağımlılık azalarak çevreyi olumsuz etkilerden uzaklaştırmaktadır [124]. Biyobozunur naylon, mikroorganizmalar tarafından belirli koşularda doğal olarak parçalanabilen naylon türüdür. Geleneksel naylona kıyasla doğada daha kısa sürede nem ve enzimler yardımıyla yok olabilmektedir. Günümüzde çoğunlukla yenilenemeyen kaynaklardan üretilen naylon için çevreye olumsuz etkilerini azaltabilmek amacıyla önemli çabalar sarf edilmektedir. Hint yağı, mısır, keten tohumu, kanola yağı gibi biyokütle kaynaklarından üretilen naylon türleri geliştirilmektedir. Daha düşük karbon ayak izine sahiptir. Biyobozunur özellikler gösterebilen en yaygın naylon, Naylon 4'tür [125]. Mantar ve bakteriler tarafından parçalanabilmektedir [126]. Karbon nötr ve bol bulunan lignoselülozik biyokütle, sürdürülebilir ürünlerin üretimi için önemli bir adaydır. Ancak, bu biyokütle heterojen ve karmaşık bir yapıya sahip olduğundan biyobazlı polimer üretimi ve biyokimyasal dönüşüm için doğrudan kullanımı zordur. Verimli bir ön işlem teknolojisine ihtiyaç duymaktadır. Biyolojik dikarboksilik asitler ve biyolojik diaminler yardımıyla bazı yarı-biyobozunur naylonlar üretime alınmış olup hâlâ geliştirme aşamasındadır.

4
HAMMADDE TERCİHLERİNİN ÇEVRESEL AYAK İZİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çevresel etkilerin detaylandırılması ve sürdürülebilirlik faaliyetleri dünya çapında giderek daha kritik bir hale gelmektedir. Sera gazı emisyonları, özellikle sanayi büyümesine odaklanan gelişmekte olan ülkelerde artış göstermektedir [127]. Hammaddelerin çıkarılmasından başlayıp atıkların bertarafına kadar geçen süreçte tekstillerin çevresel ayak izi fazladır. Her yıl, bu sektör, küresel sera gazı emisyonlarının %8-10'undan ve dünya çapında yaklaşık %20'si atıksu kirliliğinden sorumludur [128]. Ayrıca, tekstil endüstrisi, boyama ve kumaş işleme sebebiyle endüstriyel atıksu kirliliğine %20 oranında katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, okyanuslardaki birincil mikroplastik kirliliğinde de %35'lik bir paya sahiptir [129]. Bu açıdan, tekstil ürünlerinin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkinin değerlendirilmesi ve sürdürülebilirlik hedefleri çerçevesinde azaltıcı eylemlerin uygulanması ekosistemler ve insan açısından oldukça önemlidir.

İnsan faaliyetleri, yenilenemeyen enerji kaynaklarının ve hammaddelerin aşırı kullanımı ile sanayi süreçlerinde yüksek atık üretimi gibi uygulamalar ile çevresel sürdürülebilirlik üzerinde ciddi etkilere sebep olmaktadır. Bu durumla birlikte tekstil ürünlerine olan talep de giderek daha artmaktadır. Tekstil liflerine olan talep, 2010 yılında 75,5 milyon ton iken, 2030 yılına kadar 160 milyon tona ulaşması beklenmektedir [74]. Tekstil ve hazır giyim endüstrisi, tehlikeli ve toksik atıkların salımı yoluyla hava, su ve toprak kirliliği gibi çeşitli çevresel sorunlara neden olmaktadır [130]. Hammadde üretiminden iplik yapımı, kumaş dokuma ve boyama gibi süreçlere kadar büyük miktarlarda kimyasal madde ve su kullanılmakta olup, pamuk gibi hammaddelerin yetiştirilmesi için pestisitler ve besin maddeleri gerekmektedir. Tüketicilerin nihai ürünleri kullanım aşamasında ise yıkama,

kurutma ve ütüleme gibi işlemler ile enerji, su ve kimyasal tüketimi yoluyla önemli bir çevresel ayak izi tekrar oluşmaktadır [74]. Seçilen pamuk ve polyester hammaddeleri, tekstil sektöründe yaygın kullanımları, üretim süreçlerine bağlı olarak çevresel etki çeşitliliği ve farklı lif yapıları göz önünde bulundurularak analiz kapsamına alınmıştır. Bambu lifi ise biyolojik olarak parçalanabilir yapısıyla, hızlı yenilenebilirliği, düşük tarımsal girdilere olan gereksinimi ve sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıktığı için dahil edilmiştir. Bu yaklaşım, lif türleri arasındaki çevresel farkların daha açıklayıcı biçimde ortaya konmasını sağlamaktadır.

Bu bölümde, yaygın olarak kullanılan pamuk, bambu ve polyester olmak üzere üç hammadde türü karbon, su ve enerji ayak izleri bakımından değerlendirilmiştir.

4.1 Yaşam Döngüsü Analizi ve Ürün Çevresel Ayak İzi

Yaşam döngüsü analizi (LCA), bir ürünün "hammaddeden nihai bertarafa" kadar olan süreçte toplam çevresel etkilerini ölçen bir yöntemdir [130]. LCA'nın amacı, çevresel etkileri nicel olarak değerlendirmek ve sürdürülebilir üretim ve tüketim kararlarını desteklemektir. Her ürün, ürün tasarımıyla başlayan ve ardından hammadde tedariki, üretim süreçleri, lojistik, kullanım ve son olarak ürünün yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve bertarafı ile devam eden bir yaşam döngüsüne ve tedarik zincirine sahiptir. Bu aşamalardan geçen ürünler, enerji ve su kullanımı, CO_2 emisyonları ve atık üretimi gibi çevresel etkilere neden olmaktadır. LCA'nın gelişimi, 1970'lerde enerji tüketimi analizlerinden başlamıştır. 1980'lerde çevresel etki değerlendirmelerini kapsayacak şekilde genişlemiş ve 1990'larda ISO standartlarının oluşturulmasıyla bilimsel bir çerçeveye oturtulmuştur. Günümüzde, LCA yalnızca çevresel boyutları değil, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik faktörlerini de kapsayan Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi (LCSA) ile genişletilmektedir [131]. Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) 1994 yılından beri Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) çalışmalarına dahil olmuştur. Günümüzde iki uluslararası standart bulunmaktadır:

- ISO 14040 (2006): LCA'nın temel ilkelerini ve genel metodolojisini tanımlamaktadır.
- ISO 14044 (2006): LCA'nın gerekliliklerini ve metodolojik ayrıntılarını açıklamaktadır.

Bu standartlar, LCA'nın bilimsel temellere dayalı olarak gerçekleştirilmesini ve farklı uygulamalar arasında tutarlılığın sağlanmasını amaçlamaktadır. LCA süreci tekrarlamalı bir yöntemdir. Ürün tasarımına ve analiz edilen parametrelere bağlı olarak çalışmanın kapsamı yeniden değerlendirmeye alınabilmektedir.

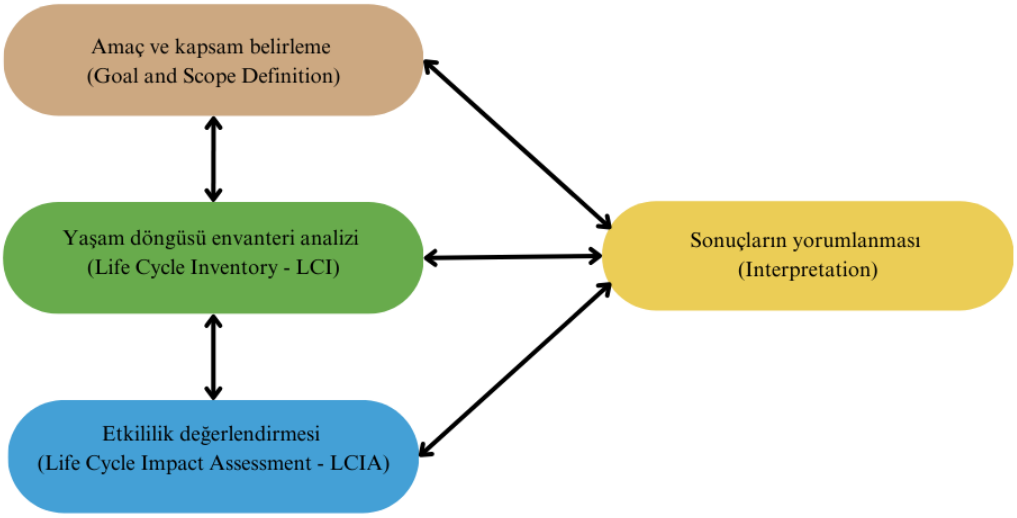
Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) yöntemi dört aşamadan oluşmaktadır (Şekil 4.1). Bu aşamalar:

- Hedef ve Kapsam: Çalışmanın amaçları belirlenmekte ve değerlendirilecek ürün tanımlanmaktadır. Kapsam belirlenirken fonksiyonel birim, sistem sınırları, veri kaynakları ve kalite gereksinimlerini göz önünde bulundurulmaktadır.
- Envanter Analizi: Ürünün yaşam döngüsündeki bütün süreçlerinden elde edilmiş veriler toplanmakta ve işlenmektedir. "Beşikten mezara" yaklaşımıyla gerçekleştirilen bu aşamada, hammadde ve enerji gereksinimleri, deşarjlar ve çevresel emisyonlar ile üretim süreçlerine ilişkin diğer bilgiler hesaplanmaktadır. Bu veriler, ürünün yaşam döngüsündeki tüm süreçlerden kaynaklanan tüketim ve deşarjların toplanarak çevresel ayak izinin hesaplanmasında kullanılmaktadır [130], [131]. Bu aşamada analiz edilmesi gerekenler şunlardır:
    - Su tüketimi
    - Enerji gereksinimi
    - Hammadde kullanımı
    - Karbon ve diğer zararlı gaz emisyonları
    - Kaynak kullanımı (yenilenemez veya yenilenebilir)
    - Taşıma süreçleri ve mesafeleri
    - Tüketici kullanımı (örneğin, yıkama, ütüleme vb.)
    - Atık bertaraf yöntemleri (yakma, çöp sahası, yeniden kullanım, geri dönüşüm, vb.) [132].

- Etki Değerlendirme: Envanter analizinden elde edilen veriler, ekolojik denge, insan sağlığı ve doğal kaynakların tükenmesi üzerindeki etkiler göz önüne alınarak değerlendirilmektedir. Çevresel etkilerin değerlendirilmesi şu kategorilerde yoğunlaşmaktadır:
    - Enerji tüketimi ve fosil yakıtların tükenmesi
    - Toksisite ve ekotoksisite
    - Su, hava ve toprak kirliliği
    - Su tüketimi ve su kıtlığına etki
    - İklim değişikliği (sera gazları ve CO_2)
- Yorumlama ve Sonuçların Değerlendirilmesi: Envanter ve etki değerlendirme aşamalarından elde edilen sonuçlara dayanarak iyileştirme önerilerin alınması gerekenler sunulmaktadır. Bu iyileştirme analizi aşamasında üretim süreçlerinde değişiklik yapılmasını, farklı hammaddelerin seçilmesini, daha düşük karbon ayak izi olan malzemelerin seçilmesini, su tüketimini azaltan süreçlerin tercih edilmesini veya alternatif ürünler arasından daha çevre dostu olanın tercih edilmesini gerektirebilmektedir [130], [131].

Sürdürülebilir malzeme seçimleri, yenilenebilir ve düşük karbon yoğunluklu alternatiflere yönelmekle mümkündür. Çevresel etki analizlerinin yapılması, hizmet ve ürünlerin tüm yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirlik ilkelerinin etkili şekilde uygulanması için oldukça önemlidir [133]. Çeşitli üretim aşamalarının çevresel sorunlarını anlamak ve sanayilerin hem sürdürülebilirlik hem de döngüsel ekonomi uygulamalarını entegre etmekle kaynakların korunmasını, atıkların ve çevresel etkilerin azaltılmasını sağlamaktadır [134]. Hizmet ve ürünlerin çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla kullanılan ve nicel bir yöntem olan yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), hammadde çıkarımı ve ürün yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini en düşük düzeye indirilmesini amaçlamaktadır. Sektörde olan sanayiler, sadece üretim aşamasına odaklanmamakta, artan sürdürülebilirlik düzenlemelerine ve yeni politikalara maruz kalmaktadır. LCA ile her kategoride (ekonomik, çevresel,

sosyal hususlar vb.) detaylı içgörüler sunulmakta ve sürdürülebilir seçimler yapma konusunda detaylı bakış açısı sunmaktadır [127].



Şekil 4.1 Yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) çerçevesi

Bu dört aşama, Şekil 4.1'de grafiksel olarak verilmiş olup ürünlerin çevresel sürdürülebilirliğini değerlendirmek amacıyla bütüncül bir yaklaşım sunarken, değerlendirme tutarlılığını artırmak amacıyla Ürün Çevresel Ayak İzi (PEF) yöntemi geliştirilmiştir. PEF, LCA'ya dayanmakta ve standartlaştırılmış bir çerçeve sunmaktadır.

Ürün Çevresel Ayak İzi (PEF), Avrupa Komisyonu tarafından 2012 yılında, ürünlerin veya hizmetlerin çevresel etkilerini yaşam döngüsü yaklaşımı kullanarak nicelendiren ve değerlendiren bir yöntem olarak geliştirilmiştir [135]. Ürünün tüm yaşam döngüsünü, geleneksel su ayak izi ve karbon ayak izi hesaplamalarından ayrı olarak, çok boyutlu ve daha kapsamlı şekilde incelemektedir. Tekstil sektörü başta olmak üzere çevresel etkisi yüksek sektörlerde, ürünlerin hammadde çıkarımından kullanım ömrünü tamamlayıncaya kadar olan tüm süreçleri inceleyerek yapılan bu değerlendirme; 16 farklı etki kategorisine dayanmaktadır (Tablo 4.1). Bir ürünün yaşam döngüsü boyunca çevreye verdiği farklı etkileri sayısallaştırmak amacıyla belirlenmiştir [136].

Tablo 4.1 Ürün çevresel ayak izinin 16 etki kategorisi [136]

NO		ETKİ KATEGORİSİ	AÇIKLAMA
1		Küresel Isınma Potansiyeli	Sera gazları nedeniyle oluşan iklim değişikliği (CO_2 eşdeğeri)
2		Ozon Tabakası İncelmesi	Stratosferik ozon tabakasının zarar görmesi
3		İnsan Toksisitesi – Kanser	Kanser riski oluşturan toksik kimyasalların etkisi
4		İnsan Toksisitesi – Kanser Dışı	Diğer toksik kimyasalların insan sağlığına etkisi
5		Partikül Madde Oluşumu	İnce toz (PM2.5) nedeniyle solunum yolu hastalıkları riski
6		İyonlaştırıcı Radyasyon (İnsan Sağlığı)	Radyoaktif emisyonların insanlar üzerindeki sağlık etkisi
7		Fotokimyasal Ozon Oluşumu	Alt atmosferde “yaz smogu” olarak da bilinen ozon oluşumu
8		Asitleşme Potansiyeli	Hava ve toprakta asit birikimi (SO_2, NO_x)
9		Toprakta Ötrofikasyon	Azot birikimi nedeniyle tarımsal toprakların bozulması
10		Tatlı Suda Ötrofikasyon	Fosfor fazlalığı nedeniyle tatlı su ekosistemlerinin bozulması
11		Deniz Ötrofikasyonu	Azot/fosfor nedeniyle denizlerde oksijensizleşme (ölü bölgeler)
12		Ekotoksisite – Tatlı Su	Tatlı sularda toksik kimyasalların ekosistem üzerindeki etkisi

Tablo 4.1 Ürün çevresel ayak izinin 16 etki kategorisi (devamı) [136]

NO		ETKİ KATEGORİSİ	AÇIKLAMA
13		Arazi Kullanımı	Tarım, sanayi veya yapılaşma amaçlı kullanılan toprakların etkisi
14		Su Kullanımı	Doğrudan veya dolaylı olarak tüketilen toplam su miktarı
15		Kaynak Kullanımı – Fosil Yakıtlar	Petrol, doğal gaz ve kömür gibi enerji kaynaklarının tüketimi
16		Kaynak Kullanımı – Mineraller ve Metaller	Maden cevherleri ve metallerin tüketimi (örn. Antimon eşdeğeri)

PEF, ürünlerin çevresel performanslarını şeffaf biçimde analiz etmeyi ve karşılaştırılabilmeyi amaçlamaktadır. Bu sayede, üreticiler daha sürdürülebilir stratejiler geliştirebilmekte; tüketiciler ise çevre açısından daha bilinçli seçimler yapabilmektedir. Büyük firmaların katılımı ile oluşturulan PEF Kategori Kuralları (PEFCR), tekstil ürünlerinin çevresel etkilerini hesaplama yönünde sektöre özgü standartlar oluşturmuştur. Bu sayede, "çevre dostu ürün" karmaşası bilimsel temele dayandırılabilmektedir [137]. Ancak bu metodolojinin bazı sınırları bulunmaktadır. Ürün ömrü varsayımları her ürün için yeterince hassas değildir. Ayrıca, biyolojik ve doğal liflerin çevreye faydaları yeterince yansıtılamamaktadır. Bu açıdan, adil ve bütünsel bir değerlendirme için geliştirilmesi gerekmektedir [138]. Bunlara ek olarak, mikroplastik gibi kirleticilerin etkileri tamamen hesaplanamamaktadır. PEF, çevresel etiketleme sistemlerinde kullanıma uygun zemin hazırlamaktadır. Tüketiciler için şeffaf bilgilendirme yaparken sürdürülebilir ürün tercih etme noktasında teşvik etmektedir.

Karbon Ayak İzi

Ürün çevresel ayak izinin (PEF) değerlendirmesinin basitleştirilmiş hali olan karbon ayak izi hesaplaması, yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) standardı olan ISO 14040'a dayanmaktadır [139]. Karbon ayak izi, belirli bir zaman dilimi içinde faaliyetler ve üretim nedeniyle dolaylı veya doğrudan olarak yayılan sera gazlarını

içermekte ve genellikle CO_2 eşdeğeri olarak ifade edilmektedir [140]. Tekstil üretim süreçlerinde ortaya çıkan karbon emisyonları, üretim aşamalarının türüne, kullanılan teknolojiye ve hammadde özelliklerine göre önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Örneğin, ring iplik eğirme yöntemiyle üretilen 1 kilogram pamuk ipliği için karbon ayak izi 1,70 ila 11,32 kg CO_2-eşdeğeri arasında değişmektedir [141]. Dokuma sürecinde ise 1 kg pamuk dokuma kumaşı için hesaplanan karbon ayak izi 16,60 kg CO_2-eşdeğeridir [9]. Boyama ve bitim işlemleri de dikkate değer seviyede emisyona yol açmaktadır; özellikle polyester kumaşların hava jeti boyama süreci sonucunda yaklaşık 2,25 kg CO_2-eşdeğeri, sentetik kumaşların ısıl işlem ve yıkama aşamalarında ise 0,91 kg CO_2-eşdeğeri karbon emisyonu meydana gelmektedir [9]. Tekstil ürünlerinin yaşam döngüsü boyunca oluşan karbon ayak izi, üretim yöntemleri, kullanılan malzeme türü ve tüketici alışkanlıklarına göre farklılık göstermektedir. Bu kapsamda yapılan karşılaştırmalarda; 1 kilogram pamuklu bir tişört için 27,27 kg CO_2-eşdeğeri, pamuk/polyester karışımlı kot pantolon için 29,35 kg CO_2-eşdeğeri ve polyesterden üretilmiş bir elbise için ise 20,92 kg CO_2-eşdeğeri karbon emisyonu hesaplanmıştır [142]. Bu veriler yardımıyla, her malzeme türü için üretim aşamalarında çevresel etkilerinin farklı olduğu ve yaşam döngüsü perspektifinin sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde önemli olduğu anlaşılabilmektedir. Sürdürülebilir süreçlerin gelişmesi ve çevresel etkilerde azalma sağlanması açısından karbon ayak izi hesaplamalarının yapılması önemlidir. Pamuk, polyester gibi tekstil hammaddelerinin üretimlerinde yüksek karbon emisyonları ortaya koyulmaktadır. Bu sebeple, geri dönüşüm, modern metotlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarının uygulanması ile sektörü çevre dostu hale getirmede önemli stratejilerdir.

Su Ayak İzi

Tekstil boyama sürecinde su, hem kimyasalların taşınmasında ve malzemelerin bir sonraki aşamaya temiz geçmesini sağlamak için kullanılmaktadır. Su ayak izi, bir ürün üretilirken kullanılan su miktarı veya bireyin kullanmış olduğu su miktarını ifade etmektedir [143]. Bu kavram, üretim süreçlerinde kullanılan toplam tatlı su hacmini ve bu kullanımın çevresel etkilerini bütüncül bir şekilde analiz etmeye olanak sağlamaktadır. Su ayak izi, mavi, yeşil ve gri su ayak izi olarak üçe ayrılmıştır [144]. Şekil 4.2'de mavi, yeşil ve gri suyun kısa tanımları verilmiştir.



Şekil 4.2 Mavi, yeşil ve gri su ayak izi tanımları [145]

- Mavi Su Ayak İzi: Üretim süreçlerinde tüketilen, yüzeylerden (göller, nehirler, rezervuarlar) ve yeraltı suyundan (akiferler) çekilen tatlı su miktarını ifade etmektedir. Kullanılan suyun geri döngüsü olmamaktadır.
- Yeşil Su Ayak İzi: Geçici olarak toprak veya bitki örtüsü üzerinde kalan yağmur suyu miktarını ifade etmektedir.
- Gri Su Ayak İzi: Belirlenmiş su kalite standartlarını sağlamak için istenen kirleticileri seyreltecek ve gerekli su kalitesini koruyacak miktarda tatlı suyun gerekli olduğunu ifade etmektedir [143], [146].

Su ayak izi, su yönetimi açısından kritik bir gösterge olarak kabul görmektedir. Pamuklu kumaşların boyama ve apreleme işlemleri tekstil sektöründe en fazla su tüketen aşamalar olup, toplam su tüketiminin %80'ine kadar ulaşabilmektedir [147]. Sentetik boyaların kullanımı sebebiyle boyama işlemleri, ağır metaller ve kimyasallarla ciddi su kirliliğine neden olmaktadır. Su tüketimini azaltmak için sürdürülebilir boyama teknikleri kullanılması geri dönüştürülmüş pamuk ve düşük su tüketimli liflerin tercih edilmesi ve atıksuyun yeniden kullanımı için gelişmiş su arıtma sistemlerinin uygulamaya alınması gibi çeşitli çevre dostu seçenekler oluşturulabilir. Atıksuyun geri dönüştürülmesiyle enerji, su ve kimyasal tüketimini azaltarak tasarruf sağlanabilmektedir. Geri dönüşüm süreci, kimyasal kalıntıların ve diğer atıkların giderilmeden önce atık suların durulama sularında ve işleme banyolarında yeniden kullanılmasıyla gerçekleşmektedir [33]. Chico ve arkadaşları (2013), pamuk pantolon için mavi, yeşil ve gri su ayak izlerini sırasıyla 2767 m^3, 263 m^3 ve 203 m^3 olarak hesaplamışlardır [148]. Hossain ve Sammad (2007) ise dokuma, örme ve denim kumaşlar için mavi ve gri su ayak izi değerlerini sırasıyla 135 L/kg ve 843 L/kg olarak raporlamışlardır. Bu değerler, iplik üretiminden son ürüne kadar olan süreçleri kapsamaktadır [149].

Enerji Ayak İzi

Tekstil sektörü, yüksek üretim kapasitesiyle sera gazları açısından en büyük sorun oluşturan kaynaklardan biridir. Geçmiş yıllarda küresel tekstil üretimi 60 milyar kg kumaş olarak tahmin edilmekte ve bunun için yaklaşık 1.074 milyar kWh elektrik (veya 132 milyon ton kömür) ile olmuştur. Büyük miktarda yenilenemeyen enerji kaynağı, esas olarak tüketici kullanımı aşamasında harcanmaktadır. Toplam enerji tüketiminin %15-20'si üretim sürecinde gerçekleşmekte, %75-80'i ise tüketicilerin çamaşır yıkama ve kurutma işlemlerinde harcanmaktadır [33].

Tarakcıoğlu (2009) yaptığı bir çalışmaya göre, 1 kg iplik üretimi için elektrik enerjisi tüketiminin 2,7 kWh/kg ile 4 kWh/kg arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca, ısıl enerji tüketiminin 1,1 MJ/kg ile 4,7 MJ/kg arasında değiştiği belirtilmiştir [150]. Koç ve Cinçik (2010)'in yaptığı çalışmada, dokuma kumaş üretimi için spesifik enerji tüketimi incelemiştir ve seçilen kumaş için elektrik enerjisi tüketimini 5,06 kWh/kg, ısıl enerji tüketimini ise 9,85 kJ/kg olarak hesaplamıştır [151]. Bu çalışmalar, tekstil sektöründe üretim süreçlerine göre, enerji tüketiminin büyük farklılıklar gösterdiğini ve ısıl ve elektrik enerji tüketiminin optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Sürdürülebilir tekstil lifleri üretiminin tercih edilmesi, doğal kaynakların korunmasına ve enerji ayak izinin azaltılması yönünde ciddi katkılar sağlayabilmektedir [152].

Ekolojik Ayak İzi

Ekolojik ayak izi, bir ürün, süreç veya hizmetin tükettiği kaynakları ve ürettiği atıkları hesaplamakta olan bir sürdürülebilirlik göstergesidir. Bu gösterge ile bir etkinliğin desteklenmesi için gereken üretken alanın büyüklüğünü ifade edilmektedir. Ayrıca, mevcut ekosistem kapasitesi ve tüketim arasındaki denge değerlendirilmektedir [153]. Ekolojik ayak izi, bütünleşik bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Bunun nedeni tüm çevresel etkileri tek bir ölçümle ifade etmesidir. Böylece, sonuçların anlaşılması ve iletişimini kolaylaştırmaktadır.

Tekstil ürünlerinin ekolojik ayak izi; su ve enerji tüketimi, biyolojik üretken arazi kullanımı (otlak, tarım arazisi, ormanlık alan), kimyasal kullanımı, karbon emisyonları ve atık yönetimi gibi temel çevresel bileşenlerin birlikte değerlendirilmesiyle hesaplanmaktadır [154].

Enerji tüketimi, elektrik ve doğal gaz gibi fosil yakıt ağırlıklı kaynaklardan sağlanan bir giyim fabrikasında ekolojik ayak izi değerlendirmesinde, en büyük etkenlerden biri hammadde tüketimi olmuştur. İncelenen giyim üretim tesisinde yıllık ekolojik ayak izi 2002'de 1965 GHa iken, 2005'te 2868 GHa'ya yükselmiştir [154].

Daha düşük çevresel etkilere sahip tekstil endüstrisi oluşturabilmek için:

- Döngüsel ekonomi ilkelerinde doğru uygulama,
- Üretim süreçlerinde iyileştirme,
- Atık yönetiminde etkin bir şekilde gerçekleştirilme gerekmektedir.

Geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçleri ile tekstil endüstrisinin sürdürülebilirliğini artırmada pozitif sonuçlar doğurabilmektedir [155].

4.2 Değerlendirmeye Alınan Hammaddelerin Çevresel Etkileri

Dünya nüfusu 8 milyarın üzerine çıkmış olup, bu durum paralel olarak tekstil liflerine olan talebin de artmasına neden olmuştur. 20 yıl öncesine kıyasla 2022 yılında küresel ölçekte 116 milyon ton tekstil lifi üretilerek iki katına çıkmıştır [109]. Bu artan talebi karşılamanın en düşük maliyetli ve kolay çözümü, moda endüstrisi pazarının %52'sini oluşturan, polyester başta olmak üzere petrol bazlı sentetik liflerdir. Ancak, bu lif türü ve diğer yenilenemeyen sentetik hammaddelerin üretimi, kullanımı ve bertarafı sonrası atık yönetimi çevreye zararlı etkiler bırakmaktadır. Bu zararlar, ürünlerin kullanım ömürlerinin dolması çözümlerinin eksikliği ve çevreye olumsuz etkilerin yüksek seviyelerde olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Petrol bazlı sentetik liflerde yaygın olan mikroplastik salımı, hava ortamları ve okyanuslar için ciddi çevresel riskler oluşturmaktadır [156]. Tarım arazisi kullanımı, su tüketimi, tarım uygulamalarının ekosisteme etkisi ve hayvancılık kaynaklı karbon salınımı gibi çevresel sorunları olsa da pamuk, yün, keten ve kenevir gibi doğal lifler uzun yıllardır kullanılmaktadır [157]. Doğal lifler, sentetik liflerin aksine, çöplüklere gömüldükten sonra %60'a kadar biyolojik olarak parçalanmasını 100 gün içinde yapmaktadır [158]. Bununla birlikte, sentetik ve doğal lifleri içeren karışımlı tekstillerin geri dönüşümünde hâlâ büyük zorluklar yaşanmaktadır; atılan tekstillerin %80'den fazlası ya yakılmakta ya da çöplüklere gönderilmektedir [157].

Yıllık küresel toplam doğal ve sentetik lif üretimi, 2000-2022 yılları arasında 24 milyon metrik tondan (MMT) 113,8 MMT'ye çıkmıştır ve 2030'a kadar 145 MMT'ye çıkması beklenmektedir [159]. Toplam lif üretimi, kimyasal ve doğal liflerden oluşmaktadır. Son yıllarda kimyasal lif kullanımı artış göstermiştir. 2000 yılında 31 MMT olan kimyasal lif üretimi, 2021 yılında 88,3 MMT'ye ulaşmış ve toplamda yaklaşık 113,6 MMT tekstil lifi üretilmiştir [160]. Sentetik tekstil ürünlerine olan talebi artıran birkaç faktör aşağıdaki gibidir:

- Mukavemet, dayanıklılık, yumuşaklık ve esneklik
- Su geçirmezlik, leke tutmazlık, düşük maliyet ve hafiflik
- Doğal liflerin arazi ihtiyacı ve büyüme sınırları

Lif türlerine göre inceleme yapıldığında, polyester en baskın sentetik lif türüdür. Lif üretimi ve tekstil endüstrisindeki uygulamaların artış göstermesiyle, tekstil ürünü üretimleri, kullanım, yıkama ve bertaraf aşamaları boyunca mikrofiber (MF) salınımı da büyük ölçüde artmaktadır [74]. Gelecekte sentetik lif üretiminin daha da artması beklenmektedir.

Doğal lifler, tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu liflerin üretiminde enerji ihtiyacı, su tüketimi, toprak kullanımı ve sera gazı emisyonları gibi çevresel faktörler büyük öneme sahiptir [5]. La Rosa ve Grammatikos (2019)'un yaptığı çalışmada 1 kg lif ve 1 kg tekstil olarak iki farklı fonksiyonel birim belirlenmiştir. Yapılan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde pamuğun diğer doğal liflere kıyasla daha yüksek enerji tüketimine sahip olduğu bulunmuştur. 1 kg pamuk lifinin üretimi 68,5 MJ enerji gerektirirken, bu değer kenevir için 31 MJ, jüt için ise 29,55 MJ olarak hesaplanmıştır. 1 ton pamuk tekstili üretmek için 1736 m^3 su tüketilirken, kenevir için ise 257 m^3 olarak belirlenmiştir. Bu açıdan pamuk endüstrisi su tüketimi açısından büyük sorunlar barındırmaktadır. Asidifikasyon ve ötrofikasyon değerleri de dolayısıyla pamuk için oldukça yüksektir. Pamuk tekstil üretiminin enerji ihtiyacı, su tüketimi ve ekolojik etki bakımından diğer doğal liflere göre daha fazla olumsuz etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur. Alternatif lifler, pamuk ile karşılaştırıldığında çok daha az çevresel ayak izine sahiptir. Bunu takip eden bölümlerde tekstilde yaygın olarak kullanılan doğal ve sentetik lifler ve çevreye verdikleri zararlar sunulmuştur.

4.2.1 Pamuk

Pamuk tekstillerinin yaşam döngüsü karmaşık ve uzundur. Bu süreç pamuk ekimi ve hasadı, üretim, tüketim ve bertaraf aşamalarını içermektedir. Genellikle pamuk, doğal bir lif olduğu için çevre dostu kabul edilmektedir, ancak tarım aşamasında yüksek miktarda su tüketimi mevcuttur ve gübre ile pestisit kullanımı gerektirmektedir. Bu durum ötrofikasyon (aşırı besin yükü) ve toksisiteye yol açabilmektedir [161]. Küresel tekstil pazarında ikinci en büyük oyuncu konumundadır ve toplam üretimin yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır [157]. Cotton Inc.'e göre, küresel pamuk üretimi dünya arazi kullanımının %3'ünü, küresel tarımsal su kullanımının %3'ünü ve küresel pestisit satışlarının %5,2'sini oluşturmaktadır [161]. Pamuk biyolojik olarak parçalanabilir olsa da geniş arazi kullanımı, tarım uygulamaları ve işleme süreçleri önemli miktarda karbon ayak izi yaratmaktadır. Çin'de pamuk tarımının hektar başına 6000 kg CO_2 salınımına neden olduğu tahmin edilmektedir [157]. Küresel pamuk üretimi ise her yıl yaklaşık 200 milyar metreküp su tüketmektedir [162]. Artan nüfusla birlikte, 2030 yılına kadar kişi başına en az 1,7 kg doğal selülozik lif açığı olacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, fiyat, performans ve çevresel ayak izi açısından mevcut pazar lifleriyle rekabet edebilecek alternatif doğal lif kaynaklarının devreye alınması kritik öneme sahiptir [157]. Moda endüstrisi mevcut üretim şeklini sürdürmeye devam ederse, 2030 yılına kadar karbondioksit (CO_2) emisyonlarının 2791 milyon tona ulaşabileceği tahmin edilmektedir [163].

Pamuklu tekstillerin yaşam döngüsü boyunca çevresel performansını incelerken en sık kullanılan etki göstergeleri 5 alanda kategorize edilebilmektedir. Bunlar, iklim değişikliği (küresel ısınma potansiyeli), asitlenme potansiyeli, su tüketimi, toksisite ve ötrofikasyon potansiyelidir. Bunun nedeni, pamuk üretimi, boyama ve ağartma süreçlerinde büyük miktarlarda su tüketilmesidir. Ayrıca, pamuk üretiminde kullanılan pestisit ve gübreler ile pamuklu tekstil üretiminde uygulanan kimyasallar çevreye toksik maddeler salabilmekte, bu da ekosistemlere ve insanlara zarar verebilmektedir. Bunun yanında, pamuklu tekstillerin yaşam döngüsü boyunca tüketilen enerji (örneğin dizel, elektrik ve doğal gaz) iklim değişikliğine ciddi katkılar sağlamaktadır [163].

Yapılan çalışmalarda organik pamuğun genel olarak konvansiyonel pamuğa kıyasla daha düşük bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, Sphera (LCA gibi alanlarda yazılım ve veri çözümleri sunan bir şirket) aynı koşullarda ama farklı yetiştirme sistemleriyle üretilen pamuk liflerinin eşzamanlı yaşam döngüsü değerlendirmesini yapmıştır. Sonuçlar, her ton tohum pamuk üretimi için mavi (sulama) su tüketiminin konvansiyonel pamuk için 1.71×10^6 kg ve organik pamuk için 1.88×10^6 kg olduğunu ortaya koymuştur [164]. Diğer bir deyişle, organik pamuk, konvansiyonel pamuk üretime kıyasla her ton tohum pamuk başına %10 daha fazla su tüketmektedir, bu da mahsullerin sulama suyu gereksinimlerinin iklim koşullarına bağlı olduğunu ve gerçek kullanımın sulama tekniklerinden de etkilendiğini göstermektedir.

Birçok araştırmacı, araştırmalarında farklı yöntemler kullanarak pamuklu tekstillerin çevresel etkilerini incelemiştir. Vos (2019), bir çift mavi kot pantolonun su ayak izi değerlendirmesini yapmış ve bölgesel su kıtlığı değişkenliğini dikkate almıştır. Sonuçlar, mavi su ayak izinin %64'ünün hammadde aşamasından, %32'sinin ise tüketici tarafından yapılan yıkama işlemlerinden kaynaklandığını ortaya koymuştur [165]. Qian ve arkadaşları (2020), 1 kg pamuklu dokuma kumaşın iplikten bitmiş kumaşa kadar olan kimyasal ayak izini değerlendirmiştir. Pamuklu dokuma kumaşların en yüksek kimyasal ayak izi, sırasıyla dokuma, yetiştirme ve hasat ile kumaş işleme aşamalarından kaynaklanmaktadır. Yapılan başka bir çalışma, 1 kg tekstil ürünü başına 1,5 ile 6,9 kg arasında kimyasal madde kullanıldığını göstermiştir. Bu durum, üretim sürecinde kullanılan kimyasal maddelerin ağırlığının, nihai giysi ağırlığından daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. [166].

Esteve-Turrillas ve Guardia (2017), yaptıkları çalışma, birçok farklı çalışmanın toplamı niteliğinde olup, özetlenen verilerden yola çıkarak aşağıdaki çevresel etki verileri değerlendirmiştir.

Organik ve konvansiyonel tarım süreçlerine bağlı çevresel etki kategorilerinin bazı yönlerden farklılık gösterdiği ortaya koyulmuştur. Ancak, aynı yetiştirme yöntemi uygulanmış olsa da traktör kullanımı, diğer tarım makineleri ve insan emeği gibi farklılıklar sebebiyle, aşağıdaki değerler benzer kabul edilebilmektedir (1 kg pamuk lifi için):

Konvansiyonel pamuk tarımının küresel ısınma potansiyeli (GWP): 0,62–5,5 kg CO_2 eşdeğeri

Organik pamuk tarımının küresel ısınma potansiyeli (GWP): 0,98–2,40 kg CO_2 eşdeğeri

Konvansiyonel pamuk tarımının su kullanımı (WU): 0,177–14,74 m^3 H_2O,

Organik pamuk tarımının su kullanımı (WU): 0,106–2,79 m^3 H_2O

Gübre ve pestisit kullanımı ile oluşan farklar iki tür için de belirgindir:

Konvansiyonel pamuk tarımının asidifikasyon potansiyeli (AP): 0,0108-0,058 kg SO_2 eşdeğeri

Organik pamuk tarımının asidifikasyon değeri (AP): 0,0050-0,0068 kg SO_2 eşdeğeri

Konvansiyonel pamuk tarımının ötrofikasyon potansiyeli (EP): 0,003-0,070 kg PO_4^{3-} eşdeğeri

Organik pamuk tarımının ötrofikasyon potansiyeli (EP): 0,0014-0,0028 kg PO_4^{3-} eşdeğeri

Bu veriler yardımıyla, konvansiyonel pamuk üretiminin organik üretime kıyasla daha yüksek çevresel etkilere sahip olduğu ortaya konmuştur.

Çırçırlama aşaması, elektrik tüketimini içermekte olup, enerji tüketimi 0,20 ile 0,95 MJ/kg arasında değişmektedir. Lif verimi de %32 ile %43 arasındadır. Hem konvansiyonel hem de organik pamuk için bu aşamada aynı şekilde uygulama yapılmaktadır. Çırçırlamanın çevresel etki verileri şu şekilde verilmiştir:

- Küresel Isınma Potansiyeli (GWP): 0,128-0,173 kg CO_2 eşdeğeri
- Asidifikasyon Potansiyeli (AP): 0,0014-0,0016 kg SO_2 eşdeğeri
- Ötrofikasyon Potansiyeli (EP): 0,0000612 kg PO_4^{3-} eşdeğeri

Çırçırlama işleminin çevresel etkisi pamuk tarımına kıyasla oldukça düşük olarak gözükmektedir.

İplik boyama işlemlerinde ise, istenen boyanın kalitesi kullanılan kimyasal miktarına bağlı olarak değişmektedir. Hem bitmiş üzerinde hem de dokuma öncesi ipliklerde boyama işlemi yapılabilmektedir. Boyama işleminin çevresel etki verileri şu şekildedir:

- Küresel Isınma Potansiyeli (GWP), 7,0-17,3 kg CO_2 eşdeğeri
- Asidifikasyon Potansiyeli (AP): 0,037-0,997 kg SO_2 eşdeğeri
- Ötrofikasyon Potansiyeli (EP): 0,00083- 0,00870 kg PO_4^{3-} eşdeğeri

La Rosa ve Grammatikos (2019)'un yaptıkları çalışmada, farklı etki kategorilerinde organik pamuk üretiminin çevresel etkileri değerlendirilmiştir. 1000 kg organik pamuk lifi için çırçır kapısındaki hesaplanan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Mavi Su Tüketimi: 182 m^3
- Küresel Isınma Potansiyeli (GWP): 978 kg CO_2-eşdeğeri
- Ötrofikasyon Potansiyeli (EP): 2,8 kg PO_4^{3-}-eşdeğeri
- Asitlenme Potansiyeli (AP): 5,7 kg SO_2-eşdeğeri
- Yenilenemeyen Birincil Enerji Tüketimi: 5759 MJ

Bu veriler ile organik pamuk üretiminde çevresel etkiler farklı boyutlarda gösterilmektedir. Özellikle karbon ayak izi (GWP) açısından geleneksel pamuk üretimine göre daha düşük emisyonlar sağlamaktadır. Ancak su tüketimi ciddiyetini koruyan bir sorundur. Verimli su yönetimi ve yenilenebilir enerjinin ve tarımda sürdürülebilirlik faaliyetlerinin yaygınlaşması ile organik pamuk üretimi daha çevreci hale getirebilmektedir [5].

4.2.2 Bambu

Hızlı büyüme oranına ve yüksek karbon tutma kapasitesine sahip olan bambu bitkisi, sürdürülebilir tekstil üretimi açısından önemli bir hammaddedir. Ev eşyaları, yapısal malzemeler, ambalaj ürünleri ve kağıt, mobilya ve biyobazlı kompozit borular gibi birçok sektörde çeşitli kullanım alanına sahiptir. Geniş kullanım alanları ve yüksek karbon tutma kapasitesi ile bambu, fosil bazlı ürünlere alternatif olarak sektörde kullanılmaktadır [7]. Kullanımları sonunda mikroorganizmalar tarafından hızlıca parçalanan bambu malzemeleri, toprağa fosfor, azot ve organik madde eklemektedir. Bu sayede ekosistemlere fayda

sağlanmaktadır. Uzun bambu lifleri, antiviral özelliklere ve yüksek mekanik dayanıma sahiptir [167]. Geleneksel ağaç ormanları ile kıyaslandığında daha az kaynak gerektirmektedir. Ek olarak, antibakteriyel özelliğe sahip olan bambu, çevre dostu lif üretimi ve farklı tekstil uygulamaları ile yenilenebilir bir kaynak olarak bilinmektedir [168]. Genellikle gübre kullanımına ve pestisite ihtiyaç duymamaktadır. Bu sayede, tarımda kimyasal kullanımını minimize ederek çevresel etkiyi azaltmaktadır. Bambu, çevreye zarar vermeden kesilmekte, tekrar yetiştirilmekte ve yeniden ekime gerek duymamaktadır [8]. Bahari ve Krause (2016) ve Restrepo ve diğerleri (2016) tarafından yapılan çalışmalarda, bambuyu üretim süreçlerinde kullanmakta ve çevresel etkinin azaltılması potansiyelini vurgulamaktadır. Restrepo ve diğerlerinin (2016) yaptığı çalışmada üretim sürecinde elektrik ve bambu atıkları enerji olarak kullanılmış olup üretim sürecinde oluşan karbon emisyonları ve önlenen emisyonlar hesaplanmıştır. Bambu atığının çürümesi önlenmiş, atmosfere salınabilecek emisyonlar engellenmiştir. Bu sayede -117 kg CO_2-eşdeğeri olarak negatif değer hesaplanmıştır. Böylece, süreç net karbon ayak izi negatif çıkmış olup bunun asıl sebebi, bambu atıklarının yakıt olarak doğrudan kullanımı ve çürüme sürecinde metan (CH_4) oluşumunun önlenmesidir. Araştırmalar, bambunun geleneksel malzemelere, sürdürülebilir bir alternatif olarak rakip olabileceğini ve karbon ayak izini önemli ölçüde indirebileceğini göstermektedir [169], [170].

Bambu, karbondioksit emme kapasitesine sahip olan ve çok hızlı büyüyen bir hammaddedir. Karbon yutma potansiyeli ile ormanlarda büyümenin olmadığı dönemlerde karbon sabitleme yetenekleri ile iklim değişikliğiyle mücadele etmektedir. Büyüme esnasında daha az su gereksinimi olduğundan ve su tasarrufu sağlayabilmek amacıyla su kıtlığı çeken bölgelerde tercih edilmektedir. Pamuk ile kıyaslandığında, ekstra sulamaya ihtiyaç duymaması ve 1 kg biyokütle üretimi için 500 L suya ihtiyaç duymasıyla oldukça çevrecidir [94].

Doğal olan ve güneş ışığı ile mikroorganizmaların yardımıyla toprakta çözünebilen bambu lifli kıyafetler kompostlanabilmekte ve çevre dostu olarak bertaraf edilebilmektedir. Bambu ormanları, birçok tür için yaşam alanı olarak biyoçeşitliliğin desteklenmesine ve yetiştirme uygulamaları, ekosistemlerin korunmasına yardımcı olmaktadır. Tardio ve diğeleri (2018) ve Hairiah ve diğerleri

(2020)'nin yaptıkları çalışmada, bambunun derin kökleri sayesinde erozyon önleme ve stabilite artırma potansiyeli olduğunu belirtmişlerdir.

Tekstil lifi olarak kullanıma dair tüm özelliklere sahip olan bambu lifinin zamanla selüloz konsantrasyonu azalabilmekte, bu da lifin özellikleri değiştirebilmektedir.

Liu ve diğerlerinin (2020) yaptığı çalışmada bambu lifleri ve şeker kamışı liflerinin beraber kullanıldığı yeni kompozit malzemeler incelemeye alınmıştır. Hem mukavemet hem de biyobozunurluk açısından yapılan çalışmada sürdürülebilirlik özellikler de dikkate alınmıştır. Yapılan testler ile malzemelerin mekanik mukavemetinde artış olmuştur. Ayrıca, bambu bazlı ürünlerin 60 gün içinde %50'den fazlasının bozunduğu belirlenmiştir. Sentetik plastiklerin 450 yıl süren parçalanma süresiyle karşılaştırma yapıldığında, bu oldukça avantajlı ve çevre dostudur. Karbon salınımı açısından bakıldığında, geleneksel plastiklere göre bambu lifleri %65 daha düşük veriye sahiptir. Ayrıca, geri dönüşüm süreci çok daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır [167].

Gu ve diğerlerinin (2018) yaptığı çalışma kapsamında iki tür bambu lifi ve polipropilen, keten ve polipropilen kompozitleri incelenmiştir. Bu kompozitlerin çevresel performansları incelenmiş ve bambu lifleriyle güçlendirilmiş kompozitlerin, keten lifleriyle güçlendirilmiş kompozitlere kıyasla daha çevre dostu olduğu görülmüştür [171]. Bambu kumaşı, genellikle pamuktan daha pahalıdır, özellikle sürdürülebilir bambu, bambu rayonuna kıyasla daha yüksek maliyetlidir. Bambunun sürdürülebilir bir şekilde yetiştirilmesi ve hasat edilmesine rağmen, çoğu bambu giysisi, bambu rayonunu üretmek için kullanılan kimyasal bir işlem olan viskoz yöntemiyle yapılmaktadır. Bu işlemde kullanılan karbon disülfür, insan üremesi için tehlikeli bir kimyasal olup, işçi sağlığını tehdit edebilir ve çevresel kirliliğe yol açabilmektedir. Mekanik bambu lifi çıkarımı, kompozit ve teknik tekstillerde kullanılsa da bu alanda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

4.2.3 Polyester

Polyester üretimi, yenilenemeyen fosil kaynaklara dayanmaktadır. 1 kg polyester lifi üretimi, 1 kg pamuk lifi üretiminden ortalama %63 daha fazla enerji tüketmektedir. Polyester üretiminde su kullanımı, pamuk yetiştiriciliğinde kullanılan su miktarının yalnızca %0,1'i kadardır. Polyester, kumaş dayanıklılığını artırmak amacıyla karışımlı olarak da kullanılmaktadır. Polyester üretimi, enerji

yoğun bir süreçtir, ancak su tüketimi çok düşüktür. Çamaşır yıkama enerji gereksinimleri, polyesterin hidrofobik yapısı nedeniyle yıkama sırasında daha az su emmesiyle azalmaktadır. Queensland Üniversitesi'nde 2009 yılında yapılan bir çalışmada, polyester liflerinden yapılan tişörtler LCA analizine alınmıştır. Üretimi sırasında 1 kg polyester için 20 kg CO_2-eşdeğeri emisyon oluşmuştur [172].

2022 yılında 74 milyon tona ulaşan küresel polyester tekstil üretiminin [173], geri dönüştürülmüş polyester (rPET) seçenekleri ile daha sürdürülebilir alternatifleri bulunmaktadır [174]. Liu ve diğerleri (2023)'nin yaptığı bir çalışmada şişelerin geri dönüştürülmesiyle yapılan polyesterin beş farklı kategoride incelemesini yaparak, 100 kg geri dönüştürülmüş filament başına 0,37 kg SO_2 eşdeğeri asidifikasyon potansiyeli düşüşü ve 32,09 kg CO_2 eşdeğeri GWP azalması olduğunu belirtmiştir [174].

Polyesterin üretim adımlarının tamamı önemli miktarda enerji gerektirmekte, bu da kilogram başına 125 MJ polyester elyafına kadar çıkabilmektedir [175]. Böylece, kilogram başına 27,2 kg CO_2 eşdeğeri polyester dokuma kumaş emisyonu oluşmaktadır [176]. Ayrıca, tedarik zincirinde atık yönetiminin doğru yapılmamasıyla, kimyasal ve/veya boyar maddeler içeren atıksular yakınlardaki su kütlelerine ulaşarak su ve toprak kirliliği oluşturabilmektedir. Sadece çevre kirliliği değil, insan ve hayvan sağlığı da tehdit edilmektedir. Ham petrol çıkartılmasıyla başlayan polyester üretim süreci sırasında kimyasal sızıntısı olabilmektedir. Üretim esnasında mikroplastiklerin bir alt grubu olan mikrofiberler havada asılı kalabilmektedir.

Geleneksel boyama yöntemlerinde, 1 kg kumaş başına 150 L'ye kadar su tüketildiği bildirilmektedir. Boyanın daha iyi liflere tutunması için termal destek gerekmekte olup 1 kg işlenmiş tekstil başına 2,31–4,14 kg CO_2 eşdeğeri emisyon oluşmaktadır [9]. Çevre dostu alternatifler arasında süperkritik CO_2 kullanılarak yapılmakta olan boyama işlemi bulunmaktadır. Endüstriyel emisyonlardan elde edilen CO_2 geri dönüştürülmekte ve kimyasal ve su kullanıma gerek kalmamaktadır. Ancak bu işlem sırasında yüksek basınç gerekli olmakta, bu da enerji tüketimi artırmaktadır [178]. Bu yöntem, birçok şirket için uygun bir yöntem değildir. Bir diğer alternatif ise çözeltide boyama işlemidir. Pigmentler erimiş polimerler ile ekstrüde edilmekte ve su ile kimyasal kullanımı olmadan lifler renklendirilmektedir. Pigmentler direkt lifin içine eklendiği için renk solması durumları oluşmamaktadır. Ancak, bu yöntemin yaygın kullanım alanı bulunmamaktadır. Bunun sebebi, istenen talebe göre anında renk çeşitliliği üretilememesidir [179].

Polyesterin olumsuz etkilerini azaltmak için çeşitli değişiklikler yapılmalıdır. Öncelik olarak, üretimin zincirinde aşamalı olarak fosil yakıt bağımlılığı bitirilmelidir. Bu, fosil yakıtların yerini yenilenebilir kaynakların alması anlamına gelmektedir. PET liflerinin daha çevre dostu hale getirilmesi ve yıkama esnasında oluşan mikrofiberleri filtre kullanımı ile minimum düzeye indirilmesi gibi düzenlemeler ile sürdürülebilirliğe katkı sağlanabilmektedir [180].

Yaşam döngüsü değerlendirmesi kapsamında yapılan çalışmalar, pamuk ve polyester gibi tekstil hammaddelerinin çevresel etkilerinin farklı üretim ve kullanım aşamalarında yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Pamuklu ürünlerde özellikle kullanım sürecinde sera gazı emisyonları ve yüksek enerji tüketimi dikkat çekmektedir. Kullanıcı alışkanlıkları ile bu etkilerin düzeyini önemli ölçüde etkilemektedir. Buna karşın, polyester üretim sürecinde fosil yakıtlara dayalı yüksek enerji tüketimi nedeniyle çevresel açıdan dezavantajlıdır. Bununla birlikte, uzun ömürlü yapısı ve geri dönüştürülebilme potansiyeli gibi bazı avantajlar sunmaktadır.

Bambu lifi ise, doğal kökenli bir selülozik lif olarak genellikle daha düşük tarımsal girdi gereksinimi ve hızlı büyüme kapasitesi sayesinde çevresel açıdan olumlu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ancak bambunun çevresel etkisi, işleme yöntemlerine (örneğin viskoz yöntemi) bağlı olarak değişkenlik gösterebilmekte olup kimyasal madde ihtiyacı olan işlemler söz konusu olduğunda bu avantajlar büyük ölçüde azalabilmektedir. Bu bağlamda, yalnızca "daha çevre dostu lif seçimi" yapmak yeterli olmayıp; çevresel etkilerin azaltılması için yenilenebilir enerji kullanımı, üretim teknolojilerinin iyileştirilmesi ve sürdürülebilir tüketim alışkanlıklarının benimsenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla hangi malzemenin tercih edileceğine karar verilirken bu tür ödünleşmelerin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır [181].

4.3 Çevresel Etkilerin İncelenmesi ve Karşılaştırılması

Giyim ve tekstil sektörü, yüksek CO_2 salımı, su tüketimi, kimyasal kullanımı, mikroplastik kirliliği ve büyük miktarda atık üretimi nedeniyle çevresel açıdan oldukça etkili bir endüstridir. Kıyafetler ve diğer tekstil ürünlerinin çevresel etkilerine yönelik farkındalık giderek artmakta ve tekstil liflerini değerlendirmek ve karşılaştırmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin, Avrupa Birliği (AB), bu sorunla mücadele edebilmek amacıyla sürdürülebilir ve döngüsel

tekstillere yönelik bir strateji geliştirmektedir. Moda sektöründe sürdürülebilirliğe yönelik çözüm önerileri büyük ölçüde teknolojik tedbirlere odaklanmaktadır. AB, tekstil üretiminin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik en yaygın önerilerden biri daha sürdürülebilir materyallerin, örneğin geri dönüştürülmüş veya organik liflerin kullanımıdır [182]. Bu açıdan, çeşitli tekstil liflerinin üretim süreçlerinde oluşturduğu çevresel etkilerini karşılaştırmak hem endüstriyel hem de tüketici bilinci açısından önem taşımaktadır. Özellikle pamuk, bambu ve polyester gibi yaygın kullanımı bulunan lif türlerinin; sera gazı emisyonları, su ve enerji tüketimi, toksisite, mikroplastik salınımı gibi çeşitli çevresel etki kategorilerindeki performanslarının incelenmesi gerekmektedir. Tablo 4.2, incelenen üç lifin 1 ton üretim bazında ölçülmüş çevresel etkilerini kapsamlı göstergeler çerçevesinde bir araya getirmektedir.

Tablo 4.2 Pamuk, bambu ve polyester için çevresel etki göstergelerinin karşılaştırılması

GÖSTERGE	PAMUK	BAMBU	POLYESTER
Karbon Ayak İzi (kg CO_2 -eşdeğeri)	2.300 – 5.900 kg CO_2-eşdeğeri/ton [23]	-400 kg CO_2-e /ton [183]	2.700 – 9.500 kg CO_2-eşdeğeri/ton [23]
Ekolojik Ayak İzi (GHa/ton)	5,57 GHa/ton (konvansiyonel pamuk için) [16]		1,67 Gha/ton
	2,17 GHa/ton (organik pamuk için) [16]		
Mavi Su Kullanımı (L)	4.171-6.875 m^3/ton [143]	Düşük [92]	
Yeşil Su Kullanımı (L)	191-1.076 m^3/ton [143]	Yüksek [92]	
Gri Su Kullanımı (L)	326-490 m^3/ton [143]	Düşük [92]	
Toplam Su Kullanımı (L)	10.000-25.000 L/ton [147]	500 L/ton [92]	5.000-10.000 L/ton [23]

Tablo 4.2 Pamuk, bambu ve polyester için çevresel etki göstergelerinin karşılaştırılması (devamı)

GÖSTERGE	PAMUK	BAMBU	POLYESTER
Enerji Tüketimi (MJ)	25.000 – 55.000 MJ/ton	10.000 MJ/ton [184]	75.000 – 125.000 MJ/ton
Asidifikasyon Potansiyeli (kg SO_2 -eşdeğeri)	28 kg SO_2 -e (konvansiyonel pamuk için) [5]	Düşük [183]	21 kg SO_2 -eşdeğeri [4]
	5,7 kg SO_2-e (organik pamuk için) [5]		
Tatlısu Ötrofikasyonu (kg P-eşdeğeri)	0,97 kg P-e/ton (konvansiyonel pamuk için) [111]	Düşük [183]	1,09 kg P-eşdeğeri [111]
	6,11 kg P-e/ton (organik pamuk için) [111]		
Deniz Ötrofikasyonu (kg N-eşdeğeri)	5,82 kg N-eşdeğeri (konvansiyonel pamuk için) [111]	Düşük [183]	0,35 kg N-eşdeğeri [111]
	11,94 kg N-eşdeğeri (organik pamuk için) [111]		
İnsan Toksisitesi	Orta [111]	Düşük-Orta [111]	Yüksek [111]
Mikroplastik Riski	Yok / İhmal Edilebilir	Yok / İhmal Edilebilir [111]	Yüksek
Yeniden Kullanılabilirlik	Orta- Yüksek [13]	Orta [13]	Yüksek [13]
Geri Dönüştürülebilirlik	Orta [13]	Düşük-Orta [13]	Yüksek [13]

Pamuk, çevresel sürdürülebilirlik açısından sentetik liflerle sıklıkla karşılaştırılmaktadır. Son yıllarda, sentetik lif üretiminin daha düşük maliyetli ve hızlı olması nedeniyle artış göstermiş ve pamuk liflerine en yaygın alternatif hâline gelmiştir. Ancak doğal ve sentetik liflerin karşılaştırılması çoğu durumda varsayımsal bir özellik taşımaktadır. Bu iki lif türü, kimyasal, fiziksel ve işlevsel özellikleri bakımından birbirinden oldukça farklıdır. Ayrıca, her iki malzemenin küresel düzeyde yıllık üretim hacimleri oldukça yüksek olup, biri diğerinin yerini alabilecek kapasiteye sahip değildir. Bir diğer açıdan, pamuk üretiminin su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde yoğunlaştığı durumlarda, fazla sulama gereksinimi ortaya çıkmakta ve bu durum su stresi riskini artırabilmektedir. Pamuk üretiminde verimi artırmak amacıyla gübre kullanımının artması ile hem yüzey hem de yeraltı sularının kirlenmesine neden olmaktadır. Fosfatlı gübrelerin kullanımı, toprakta ağır metal (örneğin kadmiyum) birikimine ve sızma yoluyla yüzey suyu ötrofikasyonuna neden olabilmektedir.

Polyester üretimi, fosil kaynaklar gibi yenilenemeyen hammaddelere ihtiyaç duymaktadır. Pamuğa kıyasla daha yüksek enerji tüketimi mevcuttur. Polyester üretiminde su kullanımı ise pamuk ve bambudan çok daha düşüktür. Ayrıca polyesterin hidrofobik yapısı ile yıkama işlemlerinde enerji gereksinimi daha azdır.

Günümüzde sürdürülebilirlik kaygıları, doğal ve geri dönüştürülmüş lifler gibi çevre dostu seçeneklerin tercih edilmesini teşvik etmektedir; bambu da bu bağlamda çok yönlülüğü ve çevreye olan minimal etkisi nedeniyle öne çıkan bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bambu türlerinin büyük bir kısmı, pamuk gibi su tüketimi yüksek tarım ürünlerine kıyasla yetiştirilme sürecinde oldukça az suya ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte, bambu çoğunlukla pestisit ve kimyasal gübre kullanımına gerek kalmaksızın doğal olarak gelişebilir. Bu durum, tarımsal üretimde kimyasal girdilere bağlı çevresel zararların azaltılmasına önemli katkı sağlamaktadır. Ayrıca bambu, hasat sonrası yeniden ekim gerektirmeksizin doğal olarak büyümeye devam edebilmekte, bu yönüyle toprak yapısına ve çevresel dengeye zarar vermeyen sürdürülebilir bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Bambu elyafı bitki kökenli olduğu için doğada mikroorganizmalar ve güneş ışığı yardımıyla biyolojik olarak parçalanabilir niteliktedir. Bu özellik, bambu kaynaklı tekstil ürünlerinin kompostlanabilir olmasını ve çevreye zarar vermeden bertaraf edilebilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca bambu ormanları, pek çok farklı tür

için yaşam alanı sunarak biyoçeşitliliğin korunmasına katkı sağlar. Sürdürülebilir bambu yetiştiriciliği, ekosistem çeşitliliğinin sürekliliğini desteklemektedir [92]. Bu gibi pozitif yönlerinden dolayı tekstil endüstrisinde bambu lif tercihinin daha yüksek olması gerekmektedir.

Tekstil üretimi ve tüketimini azaltmaya yönelik stratejiler geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Ancak, bu stratejiler hâlihazırda kavramsal düzeyde kalmaktadır. Üstelik tüketici davranışlarını öngörmek oldukça zordur; bu stratejiler uygulamaya geçse bile, tüketiciler toplam tüketimi artırmaya devam edebilmektedir. Ürünlerin ve malzemelerin çeşitli çevresel etkileri araştırılmış olmakla birlikte, sürdürülebilir tüketim sistemlerinin geliştirilmesi için tüketici davranışları hakkında daha fazla bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır.

5
SONUÇ

5.1 Genel Değerlendirme

Küresel ölçekte yüksek talep ve tüketime sahip tekstil endüstrisi, insanların günlük yaşamlarının vazgeçilmez bir parçası olması dışında, çevresel etkileriyle ciddi baskılar oluşturmaktadır. Bu ürünlerin çevresel etkilerinin azaltılmasında, özellikle üretim aşamasındaki hammadde seçimi kritik bir rol oynamaktadır. Doğru hammadde tercihi ile kullanım aşamasındaki çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve azaltılması yoluyla ekosistem üzerinde önemli katkılar sağlanabilmektedir. Tekstil endüstrisinin çevresel etkilerini azaltmak, yalnızca üretim süreçlerinde yapılacak sınırlı teknik iyileştirmelerle değil; enerji, hammadde, üretim teknolojisi, ürün tasarımı ve tüketici davranışlarını da kapsayan bütüncül ve sistematik bir dönüşümle mümkündür. Bu dönüşümün temel basamaklarından biri, sektörün fosil yakıtlara olan bağımlılığının kademeli olarak azaltılmasıdır. Özellikle kısa vadede yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, tekstil üretiminde elektrik, ısı ve buhar gibi girdilerin çevresel ayak izi üzerindeki etkisini minimize etme potansiyeline sahiptir.

Malzeme düzeyinde ise, fosil kaynaklı sentetik polimerlerin (örneğin polyester-PET) kullanımı yerine; geri dönüştürülmüş, biyobazlı veya karbondioksit bazlı yeni nesil alternatiflerin tercih edilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca üretim süreçlerinde kullanılan zararlı kimyasalların, boyar maddelerin ve katkı bileşenlerinin daha düşük toksisiteye sahip, doğa dostu hammaddelerle ikame edilmesi teşvik edilmelidir. Bu doğrultuda, su ve kimyasal kullanımını azaltan yenilikçi teknolojilere yatırım yapılmalı; ürün tasarımında ise döngüsel ekonomi ilkeleri tasarım aşamasından itibaren bütünleşik olarak ele alınmalıdır.

Sürdürülebilir tekstil üretiminin önemli yapı taşlarından biri de ürün şeffaflığıdır. Kullanılan lif türleri, boya ve katkı maddeleri gibi içeriklerin etiketleme yoluyla açıkça belirtilmesi hem tüketici bilincini artıracak hem de ürünün geri dönüştürülebilirliğini ve izlenebilirliğini kolaylaştıracaktır. Etiketleme sisteminin yasal çerçeveyle zorunlu hale getirilmesi, bu süreci daha etkin ve ölçülebilir kılacaktır. Ürün kullanım aşamasında ortaya çıkan mikro lif salımı da dikkate değer bir çevresel problemdir. Bu bağlamda, çamaşır makinelerinde ve kurutucularda mikro lif filtrelerinin yaygınlaştırılması gibi pratik ve uygulanabilir çözümler benimsenmelidir. Ayrıca, atıksu arıtma tesislerinde mikro liflerin ayrıştırılmasına yönelik teknik çözümler geliştirilerek bu liflerin geri kazanımı mümkün kılınmalı ve tekstil atıklarıyla birlikte geri dönüştürülebilir hale getirilmelidir. Değer zincirinin son halkasında ise, tekstil atıklarının toplanabilirliğini artırmak adına farkındalık çalışmaları yürütülmeli ve stratejik noktalarda erişilebilir toplama sistemleri kurulmalıdır. Bu uygulamalar, tüketici katılımını artırarak döngüsel ekonomiye geçişte kritik bir rol oynayacaktır. Sürdürülebilirliğin sağlanması, teknik yeniliklerle birlikte tüketici alışkanlıklarının dönüşümünü, düzenleyici politikaları ve etkin atık yönetimi stratejilerini içeren çok paydaşlı bir iş birliği gerektirmektedir.

Bu çalışmada daha kapsamlı inceleme altına alınan pamuk ve polyester lifleri, tekstil sektöründe en yaygın kullanılan iki temel hammaddedir. Ancak teknik özellikleri kadar çevresel etkileri açısından da önemli farklılıklar göstermektedir. Pamuk, doğal ve biyolojik olarak parçalanabilir bir lif olmasına rağmen, üretiminde yoğun su ve pestisit kullanımı ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Polyester ise düşük su kullanımı ve yüksek dayanıklılığı ile öne çıkarken, fosil yakıt temelli yapısı, yüksek enerji gereksinimi ve mikroplastik salımı gibi çevresel riskler taşımaktadır. Bu iki lif türünün karşılaştırılması ile, çevresel sürdürülebilirlik açısından "tek bir ideal çözüm" olmadığı; günümüzde ancak yenilikçi ve alternatif liflerin kullanımıyla çevresel etkilerin azaltılabileceği öngörülmektedir. Bu noktada bambu lifi, çevresel sürdürülebilirliği desteklemesiyle öne çıkmaktadır. Bambu ve bambu liflerinin çevresel sürdürülebilirlik açısından sunduğu potansiyel faydalar oldukça dikkat çekicidir. Hızlı büyüyen, yenilenebilir doğal bir kaynak olan bambu, özellikle yoğun nüfuslu ve bambunun bolca bulunduğu bölgelerde karbon ayak izinin azaltılmasında önemli bir rol oynayabilmektedir. Antibakteriyel

özellikleri ve UV koruması gibi avantajlarıyla tekstilde çok çeşitli uygulamalar için umut verici bir hammadde olmasına rağmen, ekolojik riskler ve üretim süreçlerinin çevresel etkileri de göz ardı edilmemelidir. Bambu kullanımının yaygınlaşması, ancak sürdürülebilir tarım uygulamaları, şeffaf üretim zincirleri ve çevreye duyarlı işleme teknikleriyle çevresel açıdan olumlu sonuçlar verebilmektedir.

Sonuç olarak, tekstil ürünlerinin tasarımında ve hammadde seçiminde yaşam döngüsü yaklaşımı benimsenmeli ve farklı lif türlerinin çevresel etkileri bütüncül bir çerçevede ele alınarak karar süreçleri şekillendirilmelidir.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada tek tür tekstil lifi üzerinden incelemeler yapılmıştır. Ancak tekstil endüstrisi ürünlerinde genellikle tek bir lif türü yerine farklı lif karışımları kullanılmaktadır. Örneğin pamuk-polyester, yün-akrilik ve viskon-polyester gibi karışımlar hem ürünün performansının artırılması hem de maliyet optimizasyonu açısından yaygın olarak kullanılmaktadır. Karışık lif kompozisyonlarının çevresel etkileri, basit toplamdan çıkarak yeni çevresel dinamikler ve çoklu etkilerle liflerin ayrıştırılabilirliği daha karmaşık yapıya evrilmektedir. Bu durum, liflerin ayrıştırılabilirliğini zorlaştırmakta, genellikle ek kimyasal kullanımı ve enerji veya özel ayırma teknolojileri gerektirmektedir. Bu da çevresel yükün çoğalmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple, geri dönüşüm teknolojilerinde de karışık lifler için yeni ve etkili çözümler bulunması gerekmektedir. Ayrıca, lif karışım oranları ekolojik etkilerin şekillenmesine yol açmaktadır. Bunun üzerine parametrik analizlerin yapılması gerekmektedir. Örneğin, %80 pamuk %20 polyester içeren bir kumaş ile %50 pamuk %50 polyester içeren bir kumaşın karşılaştırılmasında, pamuk oranı yükseldikçe su ihtiyacı ve tarımsal girdi kaynaklı çevresel yüklerde artış olurken, polyester oranı azalmasıyla enerji kullanımında değişiklikler ön planda olmaktadır. Bu analizler ile gerçekçi çevresel etki değerlendirmeleri yapılmakla kalmayıp, hammadde seçimi ve ürün tasarımı açısından önem teşkil etmektedir. Çoklu hammadde kombinasyonları ile daha gerçekçi ürün senaryolarını yansıtılırken, özel stratejileri ve daha karmaşık çevresel etki analizlerini zorunlu kılmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda karışık lif kompozisyonlarının sistematik bir şekilde çevresel ayak izi yönünden incelenmesi bir ihtiyaç olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] K. Thangavel ve G. Duraisamy, «Environmental Analysis of Textile Value Chain: An Overview,» %1 içinde *Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing*, Springer, 2014.

[2] Textile Exchange, «Preferred Fiber & Materials Market Report,» 2024.

[3] S. Raiskio, A. Periyasamy, M. Hummel ve P. Heikkila, «Transforming Mechanically Recycled Cotton and Linen from Post-Consumer Textiles Into Quality Ring Yarns and Knitted Fabrics,» *Waste Management Bulletin,* cilt 3, pp. 76-86, 2025.

[4] L. Shen, E. Worrell ve M. K. Patel, «Environmental Impact Assessment of Man-Made Cellulose Fibres,» *Resources, Conservation and Recycling,* cilt 55, p. 260–274, 2010.

[5] A. D. La Rosa ve S. A. Grammatikos, «Comparative Life Cycle Assessment of Cotton and Other Natural Fibers for Textile Applications,» *Fibers,* cilt 7, no. 101, 2019.

[6] J. Summerscales, N. P. Dissanayake, A. S. Virk ve W. Hall, «A Review of Bast Fibres and Their Composites. Part 1 – Fibres as Reinforcements,» *Composites: Part A,* cilt 41, no. 10, p. 1329–1335, 2010.

[7] J. Gan, M. Chen, K. Semple, X. Liu, C. Dai ve Q. Tu, «Life Cycle Assessment of Bamboo Products: Review and Harmonization,» *Science of the Total Environment,* p. 157937, 2022.

[8] A. Gupta ve A. Kumar, «Potential of Bamboo in Sustainable Development,» *Asia-Pacific Business Review,* cilt 4, no. 3, pp. 100-107, 2008.

[9] N. M. van der Velden, M. K. Patel ve J. G. Vogtländer, «LCA Benchmarking Study on Textiles Made of Cotton, Polyester, Nylon, Acryl, or Elastane,» *International Journal of Life Cycle Assessment,* pp. 331-356, 2014.

[10] B. Henry, K. Laitala ve I. G. Klepp, «Microfibres from Apparel and Home Textiles: Prospects for Including Microplastics in Environmental Sustainability Assessment,» *Science of the Total Environment,* cilt 652, pp. 483-494, 2019.

[11] S. Madhav, A. Ahamad, P. Singh ve P. K. Mishra, «A Review of Textile Industry: Wet Processing, Environmental Impacts, and Effluent Treatment Methods,» *Wiley,* cilt 27, p. 31–41, 2018.

[12] L. Edirisinghe, A. de Alwis ve M. Wijayasundara, «Sustainable Circular Practices in the Textile Product Life Cycle: A Comprehensive Approach to Environmental Impact Mitigation,» *Environmental Challenges,* cilt 16, 2024.

[13] K. Thangavel ve G. Duraisamy, «Environmental Analysis of Textile Value Chain: An Overview,» *Textile Science and Clothing Technology,* pp. 153-189, 2014.

[14] C. Costa, N. G. Azoia, C. Silva ve E. F. Marques, «Textile Industry in a Changing World: Challenges of Sustainable Development,» *U.Porto Journal of Engineering,* pp. 86-97, 2020.

[15] A. A. M. Cardoso, «Life Cycle Assessment of Two Textile Products: Wool And Cotton,» *University of Porto, Faculty of Engineering,* 2013.

[16] N. Cherrett, J. Barrett, A. Clemett, M. Chadwick ve M. Chadwick, «Ecological Footprint and Water Analysis of Cotton, Hemp and Polyester,» Stockholm Environment Institute, 2005.

[17] Hallet, Clive ve A. Johston, «Fabric for Fashion. The Complete Guide. Natural and Man-Made Fibres,» 2019.

[18] S. F. Kabir, S. Chakraborty, S. A. Hoque ve K. Mathur, «Sustainability Assessment of Cotton-Based Textile Wet Processing,» *Clean Technologies,* p. 232–246, 2019.

[19] Q. Khadijah ve M. Heba, «Environmental Production of Fashion Colors from Natural Dyes,» *International Journal of Physical Sciences,* cilt 8, no. 16, pp. 670-683, 2013.

[20] R. Bhuiyan, M. Rahman, A. Shaid, M. Bashar ve M. A. Khan, «Scope of Reusing and Recycling the Textile Wastewater After Treatment With Gamma Radiation,» *Journal of Cleaner Production,* p. 3063–3071, 2016.

[21] N. Mathur ve P. Bhatnagar, «Mutagenicity Assessment of Textile Dyes from Sanganer (Rajasthan),» *J. Environ. Biol,* 2007.

[22] Rieter, «Enerji Verimliliği,» 2025. [Çevrimiçi]. Available: https://www.rieter.com/tr/suerdueruelebilirlik/gezegen/iklim/enerji-verimliligi.

[23] G. Sandin ve G. M. Peters , «Environmental Impact of Textile Reuse and Recycling - A Review,» *Journal of Cleaner Production,* pp. 353-365, 2018.

[24] S. Sharma, «Textile Industry In Global Economy,» *EC Tax Review,* cilt 12, no. 8, pp. 203-211, Kasım 2021.

[25] M. Mansor, Z. E, S. Sapuan ve A. A. Nuraini, «Life Cycle Assessment of Natural Fiber Polymer Composites,» *Agricultural Biomass Based Potential Materials,* 2015.

[26] S. Krishnan, G. Shanmugasundar, M. Vanitha ve N. Sivashanmugam, «Mechanical Properties of Chemically Treated Banana and Ramie Fibre Reinforced Polypropylene Composites,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* cilt 961, no. 1, 2020.

[27] M. Kaya, «Yeni Tekstil Ekonomisi Kapsamında Döngüsel Moda,» *İstanbul Ticaret Üniversitesi, Master's Thesis,* 2021.

[28] J. Shen, H. Patel ve Y. Sun , «Life Cycle Assessment of Synthetic Fibers,» *Journal of Cleaner Production,* cilt 45, pp. 214-225, 2013.

[29] R. P. Singh, S. Mishra ve A. P. Das, «Synthetic Microfibers: Pollution Toxicity and Remediation,» *Chemosphere,* cilt 257, p. 127199, 2020.

[30] R. Blacburn, Sustainable Textiles: Life Cycle and Environmental Impact, Woodhead Publishing, 2009.

[31] A. Hasanbeige ve L. Price, «A Review of Energy Use and Energy Efficiency Technologies for the Textile Industry,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* cilt 16, no. 6, pp. 3648-3665, 2012.

[32] O. K. Kabakçı, «Tekstil Sanayi Sektöründe Minimum Enerji Tasarruf Potansiyelinin Belirlenmesi,» Ocak 2011.

[33] A. K. R. Choudhury, «Environmental Impacts of the Textile Industry and Its Assessment Through Life Cycle Assessment,» %1 içinde *Textile Science and Clothing Technology, Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing Environmental and Social Aspects of Textiles and Clothing Supply Chain*, Springer, 2014.

[34] D. Değirmen ve G. Şanlı, «Bir Tekstil İşletmesinde Enerji Verimliliği ve Emisyon Azaltım Olanaklarının Araştırılması: Havlu Üretim Tesisi,» cilt 27, no. 1, pp. 71-88, 2022.

[35] E. Alkaya ve G. Demirer, «A Case Study from a Woven Fabric Manufacturing Mill in Turkey,» *Journal of Cleaner Production,* cilt 65, pp. 595-603, 2013.

[36] M. Tunç, K. Kaplan, S. Sisbot ve Ü. Çamdalı, «Energy management and optimization: case study of a textile plant in Istanbul, Turkey,» *World Journal of Engineering,* cilt 13, no. 4, pp. 348-355, 1 Ağustos 2016.

[37] Y. Can, «Tekstil Sektöründe Su Kullanımı ve Atık Su Yönetimi,» *Pamukkale Üniversitesi, Denizli Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu.*

[38] E. COMMISSION, «Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry,» Seville - Spain, 2000.

[39] L. S. &. C. (LS&Co.), «The Life Cycle of A Jean,» 2007.

[40] J. Dasgupta, J. Sikder, S. Chakraborty, S. Curcio ve E. Drioli, «Remediation of Textile Effluents by Membrane Based Treatment Techniques: A State of the Art Review,» *Journal of Environmental Management,* cilt 147, pp. 55-72, 2015.

[41] H. Yukseler, N. Uzal, E. Şahinkaya, M. Kitiş, F. B. Dilek ve U. Yetiş, «Analysis of the Best Available Techniques for Wastewaters From a Denim Manufacturing Textile Mill,» *Journal of Environmental Management,* cilt 203, pp. 1118-1125, 2017.

[42] G. Zeng, H. Wu, J. Liang, S. Guo, L. Huang, P. Xu, Y. Liu, Y. Yuan, X. He ve Y. He, «Efficiency of Biochar and Compost (or Composting) Combined Amendments for Reducing Cd, Cu, Zn and Pb Bioavailability, Mobility and Ecological Risk in Wetland Soil,» *RSC Advances,* cilt 44, pp. 34541-34548, 2015.

[43] B. V. d. Bruggen, J. H. Kim, F. DiGiano, J. Geens ve C. Vandecasteele, «Influence of MF Pretreatment on NF Performance for Aqueous Solutions Containing Particles and an Organic Foulant,» *Separation and Purification Technology,* cilt 36, pp. 203-213, 2004.

[44] U. Nimkar, «Sustainable Chemistry: A Solution to the Textile Industry in a Developing World,» *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry,* cilt 9, pp. 13-17, 2018.

[45] WWF, «ürkiye, Tekstil Sektöründe Temiz Üretim Rehberi: Kaynak Kullanımında Verimlilik, Maliyetlerde Düşüş, Çevreyle Uyum,» İstanbul,Türkiye, 2018.

[46] «Better Cotton Inıtiative, Biodiversity and Land Use in Cotton Farming,» 7 Ocak 2025. [Çevrimiçi]. Available: https://bettercotton.org.

[47] TÜBA, «Ekosistem Tahribatı ve Habitat Değişiklikleri,» TÜBA Raporları, 2022.

[48] G. Çevre, «Tekstil Endüstrisinin Çevresel Yükü,» [Çevrimiçi]. Available: https://gkcevre.com/tekstil-endustrisinin-cevresel-yuku. [Erişildi: 8 Ocak 2025].

[49] Filofibra, «Tekstilde Hammadde Krizi Tırmanırken Organik İplik Talebi de Artıyor,» [Çevrimiçi]. Available: https://www.filofibra.com.tr/tr/blog/tekstilde-hammadde-krizi-tirmanirken-organik-iplik-talebide-artiyor. [Erişildi: 2025].

[50] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, «Pamuk Durum ve Tahmin Raporu 2023,» Ankara, 2023.

[51] T.C. Ticaret Bakanlığı, «2018 Yılı Pamuk Raporu,» 2019.

[52] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, «Keten Tarımı,» Samsun, 2023.

[53] E. Hazneci ve Ş. F. Arslanoğlu, «Orta Karadeniz Bölgesinde Kırsal Alanlar İçin Keten Bir Şans Mı? Kârlılık Analizi ve Yapılabilirliği,» *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, cilt 18, no. 3, pp. 586-598, 2021.

[54] S. Özbahar, «Farklı Lif Çeşitlerinden Üretilen Havluların Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi,» Haziran 2021.

[55] İpekyolu Kalkınma Ajansı, «Gaziantep İli Viskon Elyaf Üretimi Ön Fizibilite Raporu,» 2021.

[56] Food and Agriculture Organization of the United Nations, «Bamboo for sustainable development: Proceedings of the 2nd International Bamboo Congress,» Food and Agriculture Organization, 2020.

[57] International Network for Bamboo and Rattan, «Bamboo and Rattan for Inclusive and Green Development,» INBAR.

[58] Y. S. Normuminovich, A. F. Payziyevna ve A. N. Azimdjanovna, «Analysis Of The Effectiveness Of The Textile Industry,» *Vidyabharati International Interdisciplinary Research Journal,* cilt 13, no. 2, pp. 18-26.

[59] F. Akpınarlı ve I. Üner, «Geleneksel Tekstillerin Özellikleri ve Çeşitleri,» *Pamukkale University Journal of Social Sciences Institute,* pp. 133-145, 2018.

[60] K. Farhana, K. Kadirgama, A.-S. F. Mahamude ve M. T. Mica, «Energy Consumption, Environmental Impact, And Implementation Of Renewable Energy Resources in Global Textile Industries: An Overview Towards Circularity And Sustainability,» *Materials Circular Economy,* 2022.

[61] M. Brettel, N. Friederichsen, M. Keller ve M. Rosenberg, «How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective,» *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* , cilt 8, no. 1, 2014.

[62] J. Lee, H.-A. Kao ve S.-H. Yang, «Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment,» *Procedia CIRP,* pp. 3-8, 2014.

[63] E. A. Orisadare, O. E. Achukwu ve A. A. Ogunyemi, «Digitalisation and Green Strategies: A systematic review of the Textile, Apparel and Fashion Industries,» *Research Square,* 2024.

[64] W.-H. Tsia, «Green Production Planning and Control for the Textile Industry by Using Mathematical Programming and Industry 4.0 Techniques,» *Energies,* cilt 11, no. 8, p. 2072, 2018.

[65] Tekstilciyiz, «Tekstil Teknikleri: Modern Üretim Yöntemleri,» 2025. [Çevrimiçi]. Available: https://tekstilciyiz.com.tr/tekstil-teknikleri-modern-uretim-yontemleri/.

[66] M. M. Wagner ve T. Heinzel, «Human Perceptions of Recycled Textiles and Circular Fashion: A Systematic Literature Review,» *Sustainability,* cilt 12, no. 24, p. 10599, 2020.

[67] T. Wiegand ve M. Wynn, «Sustainability, the Circular Economy and Digitalisation in the German Textile and Clothing Industry,» *Sustainability,* 2023.

[68] P. K. F. Wan ve S. Jiang, «Enabling a Dynamic Information Flow in Digital Product Passports during Product Use Phase: A Literature Review and Proposed Framework,» *Sustainable Production and Consumption,* cilt 54, pp. 362-374, 2025.

[69] X. Zhang, H. Zheng ve X. Zheng, «Impact of Government Fund Policy and Blockchain Technology on Closed-Loop Supply Chains in Textile and Apparel Industry,» *Journal of Cleaner Production,* cilt 434, 2024.

[70] Q. Shi, J. Sun, C. Hou, Y. Li, Q. Zhang ve H. Wang, «Advanced Functional Fiber and Smart Textile,» *Advanced Fiber Materials,* cilt 1, pp. 3-31, 2019.

[71] Z. Wu, W. Xu, X. Wu ve X. Ding, «Life Cycle Environmental and Economic Assessment of Raw Silk Production in China,» *Sustainable Production and Consumption,* cilt 55, pp. 11-23, 2025.

[72] R. Sinclair, «Understanding Textile Fibres and Their Properties: What is a Textile Fibre?,» %1 içinde *Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology*, Woodhead Publishing Series in Textiles, 2015, pp. 3-27.

[73] C. Yun, «Natural Textile Fibres: Vegetable Fibres,» %1 içinde *Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology*, Woodhead Publishing Series in Textiles, 2015, pp. 29-56.

[74] C. Felgueiras, N. G. Azoia, C. Gonçalves, M. Gama ve F. Dourado, «Trends on the Cellulose-Based Textiles: Raw Materials and Technologies,» *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* , cilt 9, 2021.

[75] E. D. Kocak, M. Tasdemir ve C. Gul, «Sustainable Green-Based Composites from Renewable Resources in Textile: Industrial Cotton Wastes,» %1 içinde *Sustainability in the Textile and Apparel Industries*, Springer, 2020, pp. 45-61.

[76] F. S. Cundubey ve Ş. T. Azgın, «Comparative Life Cycle Assessment of Denim Manufacturing: Evaluating Conventional vs. Recycled Cotton in the Context of Renewable Energy,» *Journal of Cleaner Production,* p. 140117, 2024.

[77] C. G. Korra, K. A. Beyene ve T. A. Desta, «Study of Ethiopian Genetically Modified and Organic Cotton Fiber Quality Compared with Conventional Cotton,» *Cogent Food & Agriculture,* cilt 10, no. 1, p. 2301144, 2023.

[78] Textile Exchange, «Organic Cotton Market Report 2022,» 2022.

[79] M. A. Ali, «A Study of Organic Cotton and Bamboo Fibers,» *University of Borås, Master Thesis,* 2010.

[80] B. Gudeta, E. G. Kedisso, D. Gurmessa, D. Tesfaye, S. Damtew, W. Taye, A. Gebre-Egziabher, M. Balcha, T. Daba, A. Workie ve K. Maredia, «Adaptability of Genetically Engineered Bt Cotton Varieties in Different Growing Regions of Ethiopia,» *Advances in Agriculture,* pp. 1-15, 2023.

[81] E. G. Kedisso, J. Guenthner, K. Maredia, T. Elagib, B. Oloo ve S. Assefa, «Sustainable Access of Quality Seeds of Genetically Engineered crops in Eastern Africa - Case Study of Bt Cotton,» *GM Crops & Food Biotechnology in Agriculture and the Food Chain,* pp. 1-23, 2023.

[82] H. M. Sabir, S. H. Tahir ve M. B. Khan, «BT Cotton and its Impact on Cropping Pattern in Punjab,» *Pakistan Journal of Social Sciences,* pp. 127-134., 2011.

[83] S. K. Rajpoot, D. S. Rana ve A. K. Choudharya, «Crop and Water Productivity, Energy Auditing, Carbon Footprints and Soil Health Indicators of Bt-Cotton Transplanting Led System Intensification,» *Journal of Environmental Management,* cilt 300, p. 113732, 2021.

[84] ISAAA Brief, « Global status of commercialized biotech/ GM crops,» ISAAA Publications, 2000, 2005, 2016, 2017, 2019.

[85] W. F. Zonatti, B. M. G. Guimarães, W. Duleba ve J. . B. Ramos, «Thermoset Composites Reinforced with Recycled Cotton Textile Rsidues,» *Textiles and Clothing Sustainability,* cilt 1, no. 1, 2015.

[86] X. Jiang, Y. Bai, X. Chen ve W. Liu, «A review on Raw Materials, Commercial Production and Properties of Lyocell Fiber,» *Journal of Bioresources and Bioproducts,* pp. 16-25, 2020.

[87] I. S. Mendes, A. Prates ve D. V. Evtuguin, «Production of Rayon Fibres from Cellulosic Pulps: State of the Art and Current Developments,» *Carbohydrate Polymers,* cilt 273, p. 118466, 2021.

[88] S. Alay ve D. Yılmaz, «An Investigation Of Knitted Fabric Performances Obtained From Different Natural And Regenerated Fibres,» *Journal of Engineering Science and Design,* cilt 1, no. 2, pp. 91-95, 2010.

[89] A. A. Badr, A. El-Nahrawy ve A. Hassanin, «Comfort and Protection Properties of Tencel/Cotton Blends,» %1 içinde *Proceedings of the Beltwide Cotton Conferences*, New Orleans, LA, 2014.

[90] B. Feng, Y. Ren, L. Shi, Z. Xue, X. Li, Z. Xiao, Q. Zheng, R. Fu, L. Du ve K. Fang, «Efficient Anti-Fibrillation of Lyocell Fabric by Low-Formaldehyde Resin,» *Industrial Crops & Products,* cilt 213, 2024.

[91] J. Taylor, «Tencel - a unique Cellulosic Fibre,» *Journal of the Society Dyers and Colourists,* cilt 114, no. 7-8, pp. 191-193, 1998.

[92] A. Amjad, «Bamboo fibre: A Sustainable Solution for Textile Manufacturing,» *Advances in Bamboo Science,* cilt 7, 2024.

[93] W. Liese ve M. Köhl, «Bamboo,» %1 içinde *The Plant and its Uses*, Springer, 2015.

[94] L. Nayak ve S. P. Mishra, «Prospect of Bamboo as a Renewable Textile Fiber, Historical Overviewing, Labeling, Controversies and Regulation,» *Fashion and Textiles,* cilt 3, no. 1, 2016.

[95] R. Tomar, «Introduction to Different Fibres,» %1 içinde *Handbook of Worsted Wool and Blended Suiting Process*, 2010.

[96] W. Latif, A. Basit, A. Rehman, M. Ashraf, K. Iqbal, A. Jabbar, S. A. Baig ve S. Maqsood, «Study of Mechanical and Comfort Properties of Modal with Cotton and Regenerated Fibers Blended Woven Fabrics,» *Journal of Natural Fibers,* cilt 15, no. 3, pp. 1-10, 2018.

[97] M. U. Nazir, K. Shaker, Y. Nawab, M. Z. Fazal, M. I. Khan ve M. Umair, «Investigating the Effect of Material and Weave Design on Comfort Properties of Bilayer-Woven Fabrics,» *Journal of the Textile Institute,* cilt 108, no. 8, pp. 1319-1326, 2017.

[98] A. Majumdar, S. Mukhopadhyay ve R. Yadav, «Thermal Properties of Knitted Fabrics Made from Cotton and Regenerated Bamboo Cellulosic Fibres,» *International Journal of Thermal Sciences,* cilt 49, no. 10, pp. 2042-2048, 2010.

[99] J. Taylor, «Tencel - A Unique Cellulosic Fibre,» *Journal of the Society Dyers and Colourists,* cilt 114, no. 7-8, pp. 191-193, 1998.

[100] Environmental Justice Foundation, «The Deadly Chemicals in Cotton,» 2007. [Çevrimiçi]. Available: https://ejfoundation.org/reports/the-deadly-chemicals-in-cotton.

[101] H. M. van der Werf ve L. Turunen, «The Environmental Impacts of the Production of Hemp and Flax Textile Yarn,» *Industrial Crops and Products,* cilt 27, no. 1, pp. 1-10, 2007.

[102] J. Fike, «Industrial Hemp: Renewed Opportunities for an Ancient Crop,» *CRC Critical Reviews Plant Sciences,* cilt 35, no. 5-6, pp. 406-424, 2016.

[103] G. Gedik ve O. Avinç, «Hemp Fiber as a Sustainable Raw Material Source for Textile Industry: Can We Use its Potential for More Eco-Friendly Production?,» %1 içinde *Sustainable Textiles: Production, Processing, Manufacturing & ChemistrySustainable Textiles: Production, Processing, Manufacturing & Chemistry,* 2020, pp. 87-109.

[104] M. Jabbar ve K. Shaker, «Textile Raw Materials,» *Physical Sciences Reviews,* 2016.

[105] U. Pitimaneeyakul, «Banana Fiber: Environmental Friendly Fabric,» *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,* 2008.

[106] N. Kadınkız, M. Uzun ve Z. Çil, «Atık Esaslı Fibriller Biyoçözünür Toprak Örtüsü,» *Journal of Agricultural Research,* cilt 4, no. 2, pp. 130-142, 2021.

[107] B. Mushtag, Y. Nawab, S. Ahmad ve F. Ahmad, «An Eco-friendly Enzymatic Treatment to Prepare Spinnable Banana Fibers as an Alternative to Cotton for Textile Applications,» *International Journal of Biological Macromolecules,* p. 278, 2024.

[108] Hayteks Ekolojik Tekstil, «Banana Fiber and Yarns,» 2024. [Çevrimiçi]. Available: https://hayteks.biz.tr/banana-fiber-and-yarns/.

[109] Textile Exchange, «Preferred Fiber & Materials Market Report,» 2023.

[110] A. Smelik, «Polyester: A Cultural History,» *Fashion Practice,* cilt 15, no. 2, pp. 279-299, 2023.

[111] V. Gonzalez, X. Lou ve T. Chi, «Evaluating Environmental Impact of Natural and Synthetic Fibers: A Life Cycle Assessment Approach,» *Sustainability* , cilt 15, 2023.

[112] Handley ve Susannah, «Nylon: The Story of a Fashion Revolution,» *Baltimore: Johns Hopkins University Press,* 1999.

[113] Z. Zeng, «Treatment of Textile Wastewater with Advanced Technologies,» *Water Research,* cilt 100, pp. 415-428, 215.

[114] E. Hernandez, B. Nowack ve D. M. Mitrano, «Polyester Textiles as a Source of Microplastics from Households: A Mechanistic Study to Understand Microfiber Release During Washing,» *Environmental Science & Technology,* cilt 51, no. 12, pp. 7036-7046, 2017.

[115] T. Yang, M. Gao ve B. Nowack, «Formation of Microplastic Fibers and Fibrils during Abrasion of a Representative Set of 12 Polyester Textiles,» *Science of the Total Environment,* cilt 862, 2023.

[116] «Sustainable polyester: Challenges and Innovations,» *Journal of Cleaner Production.*

[117] The Microfibre Consortium, «Technical research report: Recycled polyester within the context of fibre fragmentation. Retrieved from https://www.microfibreconsortium.com/rpet-technical-research-report,» 2023.

[118] S. Kumartasli ve . O. Avinc, «Important Step in Sustainability: Polyethylene Terephthalate Recycling and the Recent Developments,» *Sustainability in the Textile and Apparel Industries,* 2020.

[119] M. Gao, T. Yang, C. Som ve B. Nowach, «Differences in the Release of Microplastic Fibers and Fibrils from Virgin and Recycled Polyester Textiles,» *Resources, Conservation & Recycling,* cilt 207, 2024.

[120] M. E. Yüksekkaya, G. Celep, G. Doğan, M. Tercan ve B. Urhan, «A Comparative Study of Physical Properties of Yarns and Fabrics Produced From Virgin and Recycled Fibers,» *Journal of Engineering Fibers and Fabrics,* cilt 11, no. 2, 2016.

[121] M. Esmaeili, I. Ara, V. Ippolitov, T. Rissanen ve I. Anugwom, «Unlocking Sustainable Solutions: Harnessing Recycled Polyester From Waste Polyester/Cotton Blended Textiles for Membrane Development,» *Chemical Engineering Science,* 2024.

[122] A. L. D. Robayo, «Thinking Textile Materials from Their Nature: Ethical Materials for Fashion Design with Technological, Social, and Aesthetic Sense,» *Sustainability in the Textile and Apparel Industries, Sustainable Textiles: Production, Processing, Manufacturing & Chemistry,* 2020.

[123] B. L. Deopura ve N. V. Padaki, «Synthetic Textile Fibres: Polyamide, Polyester and Aramid Fibres,» %1 içinde *Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology,* Woodhead Publishing Series in Textiles, 2015, pp. 97-114.

[124] Y. Zhu, C. Romain ve C. K. Williams, «Sustainable Polymers from Renewable Resources,» *Nature,* cilt 540, pp. 354-362, 2016.

[125] N. Yamano, N. Kawasaki, S. Ida, Y. Nakayama ve A. Nakayama, «Biodegradation of Polyamide 4 in vivo,» *Polymer Degradation and Stability,* cilt 137, pp. 281-288, 2017.

[126] R. Hu , M. Li, T. Shen, X. Wang, Z. Sun, X. Bao, K. Chen, K. Guo, L. Ji, H. Ying, P. Ouyang ve C. Zhu, «A Sustainable Process to 100% Bio-Based Nylons Integrated Chemical and Biological Conversion of Lignocellulose,» *Green Energy & Environment,* cilt 9, pp. 390-402, 2024.

[127] J. Wang ve W. Azam, «Natural Resource Scarcity, Fossil Fuel Energy Consumption, and Total Greenhouse Gas Emissions in Top Emitting Countries,» *Geoscience Frontiers,* cilt 15, 2024.

[128] C. R. S. de Oliveira, A. H. da Silva Júnior, J. Mulinari ve A. P. S. Immich, «Textile Re-Engineering: Eco-Responsible Solutions for a More Sustainable Industry,» *Sustainable Production and Consumption,* cilt 28, p. 1232–1248, 20221.

[129] P. Pandit, S. Shrivastava, S. R. Maulik, K. Singha ve L. Kumar, «Challenges and Opportunities of Waste in Handloom Textiles,» %1 içinde *Recycling from Waste in Fashion and Textiles*, 2020, p. 123–149.

[130] S. Eryuruk, «Life cycle assessment Method for Environmental Impact Evaluation and Certification Systems for Textiles and Clothing,» *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*, pp. 125-148, 2015.

[131] J. Guinee, R. Heijungs ve G. Huppes, «Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future,» *Environmental Science & Technology,* cilt 45, no. 1, pp. 90-96., 2011.

[132] A. P. Periyasamy ve J. Militky , «LCA (Life Cycle Assessment) on Recycled Polyester,» %1 içinde *Textile Science and Clothing Technology*, 2020.

[133] A. P. Velenturf ve P. Purnell, «Principles for a Sustainable Circular Economy,» *Sustainable Production and Consumption,* cilt 27, no. 1, p. 1437–1457, 2021.

[134] N. Hemali, A. De Alwis, M. Wijesundara ve L. Edirisinghe, «A Method for Determining the Recycling Value of Unprocessed Municipal Solid Wastein one Cubic Meter Waste Comosition Analysis Technique,» *MethodsX,* cilt 12, 2024.

[135] C. Jogner ve P. Nojpanya, *A Comparison of Different Frameworks for Product Environmental Performance*, Gothenburg, Sweden: Master's thesis in Industrial Ecology, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2021.

[136] European Commission, Joint Research Centre, «Understanding the Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprints Methods,» Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022.

[137] L. Lüttin, «PEFCR for Apparel and Footwear: What It Means for Fashion Brands,» Carbonfact, Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Available: https://www.carbonfact.com/blog/policy/pefcr-apparel-and-footwear. [Erişildi: 2025].

[138] I. G. Klepp, K. Laitala, L. L. Berg, T. S. Tobiasson, J. Måge ve K. K. Hvass, «Critical review of Product Environmental Footprint (PEF): Why PEF Currently Favors Synthetic Textiles (Plastics) and Therefore Also Fast Fashion,» SIFO, Oslo Metropolitan University, 2023. [Çevrimiçi]. Available: https://clothingresearch.oslomet.no/wp-content/uploads/sites/1026/2023/02/Background-paper-on-PEF.pdf. [Erişildi: 2025].

[139] G. Peters, S. Roos, G. Sandin, B. Zamani ve M. Svanström, «Carbon Footprints in the Textile Indutry,» %1 içinde *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*, 2016, pp. 3-30.

[140] J. Zhang, X. Qian ve J. Feng, «Review of Carbon Footprint Assessment in Textile Industry,» *Ecofeminism and Climate Change,* pp. 51-56, 2020.

[141] M. F. Astudillo, G. Thalwitz ve F. Vollrath, «Life Cycle Assessment of Indian Silk,» *Journal of Cleaner Production,* pp. 158-167, 2014.

[142] S. Roos, G. Sandin, B. Zamani ve G. Peters, «Environmental Assessment of Swedish Fashion Consumption. Five Garments - Sustainable Futures,» Gothenburg, Sweden, 2015.

[143] E. Yeşil Şimşek , A. Dal, E. Öztürk ve M. Kitiş, «Pamuklu Tekstil Üretiminde Su Ayak İzinin Değerlendirilmesi,» *Journal of Engineering Sciences and Design,* cilt 11, no. 3, pp. 1167-1173, 2023.

[144] X. Ren, X. Bai, M. Hu, D. Liu, Y. Wu ve Z. Zhang, «Water Footprint Assessment of Textile Enterprise based on ISO14046,» *Desalination and Water Treatment,* cilt 168, pp. 216-223, 2019.

[145] T. Baştak, S. Orr, B. Sel, F. Kalemci, N. Çiçek ve S. Coşkun, «ürkiye'nin Su Ayak İzi Raporu: Su, Üretim ve Uluslararası Ticaret İlişkisi,» WWF-Türkiye, Pegasys Strategy and Development, 2014.

[146] S. S. Muthu, «Calculating the Water and Energy Footprints of Textile Products,» *Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain,* pp. 78-94, 2014.

[147] D. Mikucioniene, D. Mínguez-García, M. R. Repon, R. Milašius, G. Priniotakis, I. Chronis, K. Kiskira, R. Hogeboom, R. Belda-Anaya ve P. Díaz-García, «Understanding and Addressing the Water Footprint in the Textile Sector: A Review,» *AUTEX Research Journal,* cilt 24, no. 1, 2024.

[148] D. Chico, M. M. Aldaya ve A. Garrido, «A Water Footprint Assessment of a Pair of Jeans: the Influence of Agricultural Policies on the Sustainability of Consumer Products,» *Journal of Cleaner Production,* cilt 57, pp. 238-248, 2013.

[149] L. Hossain ve M. S. Khan, «Blue and Grey Water Footprint Assessment of Textıle Industries of Bangladesh,» %1 içinde *Fifth International Conference on Chemical Engineering (ICChE 2017)*, Dhaka, Bangladesh, 2017.

[150] A. Cay, I. Tarakcioglu ve A. Hepbasli, «A Study on the Exergetic Analysis of Continuous Textile Dryers,» *International Journal of Exergy,* cilt 6, no. 3, pp. 422-439, 2009.

[151] E. Koç ve E. Çinçik, «Analysis of Energy Consumption in Woven Fabric Production,» *Fibres & Textiles in Eastern Europe,* pp. 14-20, 2010.

[152] S. Palamutcu, «Energy Footprints in the Textile Industry,» %1 içinde *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*, 2015, pp. 31-61.

[153] M. Wackernagel ve W. Rees, Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth, Gabriola Islands, BC: New Society Publishers, 1996.

[154] E. Roca ve M. Herva, «Ecological Footprints in the Textile Industry,» %1 içinde *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*, 2015, pp. 63-82.

[155] S. Abagnato, L. Rigamonti ve M. Grosso, «Life Cycle Assessment Applications to Reuse, Recycling and Circular Practices for Textiles: A Review,» *Waste Management,* cilt 182, pp. 74-90, 2024.

[156] European Environment Agency, «Plastic in Textiles: Towards a Circular Economy for Synthetic Textiles in Europe,» 2021. [Çevrimiçi]. Available: https://www.eea.europa.eu/publications/plastic-in-textiles-towards-a.

[157] R. E. Vera, K. A. Vivas, F. Urdaneta, J. Franco, R. Sun, N. Forfora, R. Frazier, S. Gongora, D. Saloni, L. Fenn, J. Y. Zhu, H.-m. Chang, H. Jameel ve R. Gonzalez, «Transforming non-wood feedstocks into dissolving pulp via organosolv pulping: An Alternative Strategy to Boost the Share of Natural Fibers in the Textile Industry,» *Journal of Cleaner Production,* cilt 429, 2023.

[158] M. C. Zambrano, J. J. Pawlak, J. Daystar , M. Ankeny ve R. A. Venditti , «Impact of Dyes and Finishes on the Aquatic Biodegradability of Cotton Textile Fibers and Microfibers Released on Laundering Clothes: Correlations Between Enzyme Adsorption and Activity and Biodegradation Rates,» *Marine Pollution Bulletin,* cilt 165, 2021.

[159] A. P. Periyasamy ve A. Tehrani-Bagha, «A Review on Microplastic Emission from Textile Materials and Its Reduction Techniques,» *Polymer Degradation and Stability,* cilt 199, p. 109901, 2022.

[160] D. Surana, Vinay, P. Patel, P. Ghosh , S. Sharma, V. Kumar ve S. Kumar, «Microplastic Fibers in Different Environmental Matrices from Synthetic Textiles: Ecotoxicological Risk, Mitigation Strategies, and Policy Perspective,» *Journal of Environmental Chemical Engineering,* cilt 12, p. 112333, 2024.

[161] F. Chen, X. Ji ve X. Chu, «A Review: Life Cycle Assessment of Cotton Textiles,» *Industria Textila,* cilt 72, no. 1, 2021.

[162] A. Chapagain, A. Hoekstra, H. Savenije ve R. Gautam, «The Water Footprint of Cotton Consumption: An Assessment of the Impact of Worldwide Consumption of Cotton Products on the Water Resources in the Cotton Producing Countries,» *Ecological Economics,* cilt 60, no. 1, p. 186–203, 2006.

[163] S. Chen, L. Zhu, L. Sun, Q. Huang, Y. Zhang, X. Li, X. Ye, Y. Li ve L. Wang, «A Systematic Review of the Life Cycle Environmental Performance of Cotton Textile Products,» *Science of the Total Environment,* 2023.

[164] Laudes Foundation, «Life Cycle Assessment of Cotton Cultivation Systems: Better Cotton, Conventional Cotton and Organic Cotton,» 2018. [Çevrimiçi]. Available: https://www.laudesfoundation.org/media/43anrffi/4332-environmentall-care-port-june19.pdf.

[165] R. O. Vos, «The Spatially Explicit Water Footprint of Blue Jeans: Spatial Methods in Action for Sustainable Consumer Products and Corporate Management of Water,» *Case Studies in the Environment* , pp. 1-14, 2019.

[166] J.-H. Qian, Y.-Y. Qiu, Y.-D. Yang, Y. Li, P.-H. Xu ve L.-L. Wang, «Accounting and Evaluation of Chemical Footprint of Cotton Woven Fabrics,» *Industria Textila,* cilt 71, no. 3, pp. 209-214, 2020.

[167] C. Liu, P. Luan, Q. Li, Z. Cheng, X. Sun, . D. Cao ve H. Zhu, «Biodegradable, Hygienic, and Compostable Tableware from Hybrid Sugarcane and Bamboo Fibers as Plastic Alternative,» *Matter* , p. 2066–2079, 2020.

[168] R. M. Kozłowski ve M. Mackiewicz-Talarczyk , «Introduction to Natural Textile Fibres,» %1 içinde *Handbook of Natural Fibres (Second Edition)* , Woodhead Publishing, 2020, pp. 1-13.

[169] S. A. Bahari ve A. Krause, «Utilizing Malaysian Bamboo for Use in Thermoplastic Composites,» *Journal of Cleaner Production,* pp. 16-24, 2016.

[170] Restrepo, Becerra ve Tibaquira, «Energetic and Carbon Footprint Analysis in Manufacturing Process of Bamboo Boards in Colombia,» *Journal of Cleaner Production,* pp. 563-571, 2016.

[171] F. Gu, Y. Zheng, W. Zhang, X. Yao, D. Pan, A. S. M. Wong, J. Guo, P. Hall ve N. Sharmin, «Can Bamboo Fibres be an Alternative to Flax Fibres as Materials for Plastic Reinforcement? A Comparative Life Cycle Study on Polypropylene/Flax/ Bamboo Laminates,» *Industrial Crops & Products,* pp. 372-387, 2018.

[172] S. S. Muthu, «Comparative Life Cycle Assessment of Natural and Man-Made Textiles,» %1 içinde *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing,* 2015, pp. 275-281.

[173] H. Sun, Z. Chen , J. Zhou , L. Chen ve W. Zuo, «Recovery of High-Quality Terephthalic Acid from Waste Polyester Textiles via a Neutral Hydrolysis Method,» *Journal of Environmental Chemical Engineering,* cilt 12, 2024.

[174] Q. Liu, B. Yingying, D. Liming, D. Li ve L. Jingyang, «Comparative Analysis of the Environmental Impact of Virgin and Recycled PET Fibers Based on Life Cycle Assessment,» *Journal of Environmental Engineering Technology,* cilt 13, no. 4, 2023.

[175] S. S. Muthu, Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain, Woodhead Publishing, Textiles and Fashion, 2020.

[176] European Commission’s Joint Research Centre, «Environmental Improvement Potential of Textiles (IMPRO textiles),» 2014.

[177] E. Onwuka, «Oil Extraction, Environmental Degradation and Poverty in the Niger Delta Region of Nigeria: A Viewpoint,» *International Journal of Environmental Studies,* cilt 62, no. 6, p. 655–662, 2006.

[178] R. Chavan, «Chapter 16: Environmentally Friendly Dyes,» %1 içinde *Handbook of Textile and Industrial Dyeing Principles, Processes and Types of Dyes,* Sawston, Woodhead Publishing, 2011, p. 515–561.

[179] N. Terinte, B. Manda, J. Taylor, K. Schuster ve M. Patel, «Environmental Assessment of Coloured Fabrics and Opportunities for Value Creation: Spin-Dyeing versus Conventional Dyeing of Modal Fabrics,» *Journal of Cleaner Production,* cilt 72, pp. 127-138, 2014.

[180] C. Palacios-Mateo, Y. van der Meer ve G. Seide, «Analysis of the Polyester Clothing Value Chain to Identify Key Intervention Points for Sustainability,» *Environmental Sciences Europe,* cilt 33, no. 2, 2021.

[181] Z. Yu ve Y. Yang, «Carbon Footprint of Global Cotton Production,» *Resources, Environment and Sustainability,* cilt 20, no. 100214, 2025.

[182] A. S. Sigaard ve K. Laitala, «Natural and Sustainable? Consumers’ Textile Fiber Preferences,» *fibers,* cilt 11, no. 12, 2023.

[183] P. v. d. Lugt ve J. Vogtländer, «The Environmental Impact of Industrial Bamboo Products: Life-Cycle Assessment and Carbon Sequestration,» International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), 2015.

[184] TomJ, «Why Bamboo Clothing: Comfort and Sustainability,» BambooGetUp, 2024. [Çevrimiçi]. Available: https://bamboogetup.com/why-bamboo-clothing-comfort-and-sustainability/#Environmental_Impact_Bamboo_vs_Cotton. [Erişildi: 2025].

[185] G. Victoria, X. Lou ve T. Chi, «Evaluating Environmental Impact of Natural and Synthetic Fibers: A Life Cycle Assessment Approach,» *Sustainability,* cilt 15, 2023.

[186] N. Sivaram, M. Gopal ve D. Barik, «Toxic Waste From Textile Industries,» %1 içinde *Energy from Toxic Organic Waste for Heat and Power Generation,* Woodhead Publishing Series in Energy, 2019, pp. 43-54.

[187] M. Pesic, I. Nemesa, N. Bukhonka ve V. Bozoki, «Fruit-Based Sustainable Textile Materials,» %1 içinde *9th International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies* , Budapest,Hungary, 2023.

[188] M. M. Mekonnen ve A. Y. Hoekstra, «The green, Blue and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crop Products,» *Hydrology and Earth System Sciences,* cilt 15, no. 5, p. 1577–1600, 2011.

[189] CottonWorks, «Pamuk Sürdürülebilirliği Temelleri,» [Çevrimiçi]. Available: https://cottonworks.com/en/topics/turkce/surdurulebilirlik/pamuk-surdurulebilirligi-temelleri/.

[190] F. Alper, «ürdürülebilirlik Kavramı İçerisinde Su Ayak İzi: Tekstil Sektörü Örneği,» *üksek Lisans Tezi, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı, İstanbul Teknik Üniversitesi,* 2015.

[191] Greenpeace, «Dirty Laundry 2: Hung Out to Dry - Unraveling the toxic trail from * pipes to products».

[192] «ANANAS ANAM,» [Çevrimiçi]. Available: https://www.ananas-anam.com/about-us/.

[193] S. Moazzem, E. Crossin, F. Daver ve L. Wang, «Environmental Impact of Apparel Supply Chain and Textile Products,» *Environment, Development and Sustainability,* p. 9757–9775, 2022.

[194] Cosetex, «What is Really Ecological in the Textile Sector? Ecological Fibre, Silk Yarns, Silk Products,» 2025. [Çevrimiçi]. Available: https://www.cosetex.it/en/news/silk-eco-textiles-fiber-yarn-co2-pollution-products/.

[195] J. Kitzes, A. Peller, S. Goldfinger ve M. Wackernagel, «Current Methods for Calculating National Ecological Footprint Accounts,» *Science for Environment & Sustainable Society,* cilt 4, no. 1, pp. 1-9, 2007.

[196] S. Nagel, «Exploring Ways to Reduce the Greenhouse Gas Emissions in the Textile Supply Chain,» *Bachelors of Industrial Engineering Thesis, Faculty of Engineering, Built Environment and Information Technology, University of Pretoria,* 2010.

[197] G. Smith ve R. Barker , «Life Cycle Analysis of a Polyester Garment,» *Resources, Conservation and Recycling,* cilt 14, p. 233–249, 1995.

[198] J. K. Steinberger, D. Friot, O. Jolliet ve S. Erkman, «A Spatially Explicit Life Cycle Inventory of the Global Textile Chain,» *The International Journal of Life Cycle Assessment,* cilt 14, p. 443–455, 2009.

[199] S. S. Muthu, «Measuring the Environmental Impact of Textiles in Practice: Calculating the Product Carbon Footprint (PCF) and Life Cycle Assessment (LCA) of Particular Textile Products,» %1 içinde *Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain*, Cambridge, UK, Woodhead Publishing, 2014, pp. 163-179.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

[1] Elif Ayça ÇAKAR, Güleda ENGİN, The Impact of Raw Material Selection on the Environmental Footprint of Textile Products, Grad Symposium 2025-Mühendislikte Sürdürülebilir Çözümler.