

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE DÖNGÜSEL EKONOMİ
PERSPEKTİFİNDEN KOT YIKAMADA KULLANILAN
POMZA TAŞININ YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE
ÇEVRESEL ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Emine Şule TECİRLİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Hanife SARI ERKAN

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Ekonomi Perspektifinden Kot
Yıkamada Kullanılan Pomza Taşının Yaşam Döngüsü Analizi ile
Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi**

Emine Şule TECİRLİ tarafından hazırlanan tez çalışması 29.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hanife SARI ERKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Hanife SARI ERKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Güleda ENGİN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sadullah Levent KUZU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Hanife SARI ERKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Ekonomi Perspektifinden Kot Yıkamada Kullanılan Pomza Taşının Yaşam Döngüsü Analizi ile Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi” 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.

Emine Şule TECİRLİ

İmza

Kıymetli hocalarıma,

değerli aileme

ve

arkadaşlarıma

TEŞEKKÜR

Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümündeki lisans ve lisansüstü yolculuğum boyunca göstermiş olduğu paha biçilmez destekleri, rehberliği ve anlayışı ile bana her zaman ilham kaynağı olan çok kıymetli tez danışmanım Doç. Dr. Hanife Sarı ERKAN'a,

Engin bilgi ve tecrübesiyle öğrencilerine her daim destek veren Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölüm Başkanı saygıdeğer hocam Prof. Dr. Güleda ENGİN'e,

Bu tez çalışmasında kullanılmak üzere kot yıkama fabrikasına ilişkin verilerin temin edilmesi konusunda şeffaflıkla ve anlayışla desteklerini gösteren Bilgesu ALTUNKAN EKİM başta olmak üzere Ereks Blue Matters ekibine,

Bu çalışmaya doğrudan veya dolaylı olarak katkıda bulunan Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümündeki tüm hocalarıma,

Her anımda desteklerini bir an olsun eksik hissetmediğim, tüm süreçlerimde benim yanımda olan ve her kararımda benimle ilerleyen başta canım annem Mahinur SÜSLÜ, çok sevgili ablalarım Elife ORTA ve Fatma TOPAL olmak üzere tüm aileme,

Manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok sevgili arkadaşım Mısra ERMİŞ başta olmak üzere tüm kıymetli arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim ve saygılarımı sunarım.

Emine Şule TECİRLİ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	5
2 TEKSTİL ENDÜSTRİSİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ	6
2.1 Tekstil Endüstrisinin Tanımı ve Önemi	6
2.1.1 Ekonomik Önem	6
2.1.2 Sosyal Önem	7
2.2 Tekstil Endüstrisinin Üretim Prosesi	7
2.3 Tekstil Endüstrisinin Çevresel Etkileri	10
2.3.1 Hammadde Üretimi	10
2.3.2 Tekstil İmalatı	11
2.3.3 Kullanım Aşaması	11
2.3.4 Kullanım Ömrü	11
3 KOT YIKAMA PROSESİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ	13
3.1 Kot Yıkama Prosesi	13
3.2 Kot Yıkama Yöntemleri	14
3.2.1 Geleneksel Kot Yıkama Yöntemleri	15
3.2.2 Modern ve Çevre Dostu Kot Yıkama Yöntemleri	16
3.3 Kot Yıkamada Pomza Taşının Yeri	19
4 SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK, DÖNGÜSEL EKONOMİ VE TEKSTİL ENDÜSTRİSİ	22
4.1 Sürdürülebilirlik Kavramı ve Önemi	22
4.1.1 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri	24
4.1.2 Tekstil Endüstrisinde Sürdürülebilirlik Uygulamaları	25
4.2 Döngüsel Ekonomi Kavramı ve Önemi	28
4.2.1 Döngüsel Ekonomi ve Temel Prensipleri	28

4.2.2	Tekstil Endüstrisinde Döngüsel Ekonomi Yaklaşımları	30
5	YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ (YDA)	32
5.1	Yaşam Döngüsü Analizi Kavramı ve Tanımı	32
5.2	Yaşam Döngüsü Analizi'nin Temel Adımları	34
5.3	Yaşam Döngüsü Analizi'nin Tekstil Endüstrisindeki Yeri	35
5.4	Yaşam Döngüsü Analizi'nin Sürdürülebilirlik Değerlendirmelerindeki Yeri	37
6	MATERYAL VE METOD	38
6.1	Çalışma Alanı	38
6.2	Çalışmaya Ait Verilerin Toplanması	41
6.3	Yaşam Döngüsü Analizi için Kullanılan Programlar	41
6.4	GaBi Yazılımı ve Yaşam Döngüsü Analizi	43
6.4.1	GaBi yazılımının Tanımı ve Özellikleri	43
6.4.2	GaBi ile Yaşam Döngüsü Yapmanın Avantajları ve İşleyişi	45
7	ARAŞTIRMA BULGULARI	47
7.1	Denim Üretim Süreci Yıkama Prosesi Yaşam Döngüsü Analizi Sonuçları	47
7.1.1	Asitletme Potansiyeli	51
7.1.2	Küresel Isınma Potansiyeli	51
7.1.3	İnsan Toksisite Potansiyeli	52
7.1.4	Ekotoksisite	53
7.1.5	Ötrofikasyon Potansiyeli	53
7.1.6	Ozon Tüketme Potansiyeli	54
7.1.7	Arazi Kullanımı	55
7.1.8	Su Kullanımı	55
7.1.9	Partikül Madde	56
7.1.10	Fotokimyasal Ozon Oluşumu	57
7.1.11	İyonlaştırıcı Radyasyon- İnsan Sağlığı	57
7.2	Denim Üretim Süreci Yıkama Prosesi Kaynaklı Emisyon Hesaplamaları	58
7.2.1	Elektrik tüketiminden kaynaklı emisyon hesaplamaları	58
7.2.2	Su tüketimi kaynaklı emisyon hesaplamaları	59
7.3	Denim Üretim Süreci Yıkama Prosesinin Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi	59
7.3.1	F-Stone ile sürdürülebilir denim yıkama prosesi	61
8	SONUÇ	62
	KAYNAKÇA	64



SİMGELİSTESİ

CH ₄	Metan gazı
CO ₂	Karbon dioksit
dk	Dakika
H ⁺	Hidrojen gazı
HCl	Hidroklorik asit
HF	Hidrojen florür
kBq U235	kiloBecquerel Uranium-235 (kiloBekerel Uranyum-235)
kg	Kilogram
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
L	Litre
mt	Metrik ton
NH ₃	Amonyak
N ₂ O	Nitröz oksit
NO _x	Nitrojen oksit
SO ₂	Kükürt dioksit

KISALTMA LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
BT	Bilgi Teknolojileri
CAD	Carbon Asset Development (Karbon Varlık Geliştirme)
CFC	Chlorofluorocarbon (Kloroflorokarbon)
CFC-11	Chlorofluorocarbon-11 (Kloroflorokarbon-11)
CTUe	Comparative Toxic Unit for ecosystems (Ekosistemler için Karşılaştırmalı Toksik Birim)
CTUh	Comparative Toxic Unit for humans (İnsanlar için Karşılaştırmalı Toksik Birim)
EPD	Environmental Product Declaration (Çevresel Ürün Deklarasyonu)
EPR	Extended Producer Responsibility (Üretici Sorumluluğu)
ERP	Enterprise Resource Planning (Kurumsal Kaynak Planlaması)
GHG	Greenhouse Gas (Sera Gazı)
GOTS Standardı	Global Organic Textile Standard (Küresel Organik Tekstil Standardı)
GSYİH	Gayri safi yurtiçi hasıla
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
LCA	Life Cycle Assessment (Yaşam Döngüsü Analizi)
LCC	Life Cycle Cost (Yaşam Döngüsü Maliyeti)
LCI	Life Cycle Inventory (Yaşam Döngüsü Envanteri)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi)
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment (Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi)
MDG	Binyıl Kalkınma Hedefleri
NMVOC	Non-Methane Volatile Organic Compounds (Metan Dışı Uçucu Organik Bileşikler)
OEKO-TEX	International Association for Research and Testing in the Field of Textile and Leather Ecology (Tekstil ve Deri Ekolojisi Alanında Araştırma ve Test Derneği)
PLM	Product Lifecycle Management (Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi)
PM _{2.5}	Particulate Matter 2.5 (Partikül Madde 2,5)
Pt	Person equivalent (Kişi eşdeğeri)
RWS	Responsible Wool Standard (Sorumlu Yün Standardı)

SDG	Sustainable Development Goals (Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri)
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry (Çevre Toksikolojisi ve Kimyası Derneği)
SLCA	Social Life Cycle Assessment (Sosyal Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi)
VOCs	Volatile Organic Compounds (Uçucu Organik Bileşikler)
YDA	Yaşam Döngüsü Analizi



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Tekstil sektörü üretim prosesi [52].....	9
Şekil 2.2	1975'ten 2022'ye kadar dünya çapında kimyasal ve tekstil elyaflarının üretim hacmi (1000 metrik ton olarak) [53]	10
Şekil 3.1	Farklı yıkama yöntemleri sonucu denim görüntüleri [71].....	15
Şekil 3.2	Sürdürülebilir kot yıkama için önemli parametreler [75].....	17
Şekil 3.3	Kot yıkama işleminde kullanılan pomza taşları	19
Şekil 3.4	Yıkamada kullanılmadan önce ve sonra pomza taşının değişimi [80] ...	21
Şekil 4.1	Sürdürülebilirlik Venn Diyagramı.....	23
Şekil 4.2	Sürdürülebilir kalkınma hedefleri [89].....	24
Şekil 4.3	Tekstil sektöründe karbon ayak izinin azaltılma yolları [101]	27
Şekil 4.4	Döngüsel ekonomi yaklaşımı [107]	28
Şekil 5.1	Yaşam döngüsü analizi akım şeması [120]	33
Şekil 5.2	Yaşam döngüsü analizi metodolojisi [121]	34
Şekil 5.3	Yaşam döngüsü girdileri, sistem sınırları ve çıktıları.....	35
Şekil 6.1	Denim üretimi proses akım şeması	38
Şekil 6.2	ReCiPe modeli yapısı [134]	43
Şekil 6.3	Sphera Gabi yazılımı ara yüzü	46

TABLO LİSTESİ

Tablo 3. 1 Pomza taşının kimyasal bileşiği [81]	20
Tablo 7. 1 YDA etki kategorileri göstergeleri [149].....	48
Tablo 7. 2 Etki kategorilerine göre yaşam döngüsü analizi sonuçları	49



Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Ekonomi Perspektifinden Kot Yıkamada Kullanılan Pomza Taşının Yaşam Döngüsü Analizi ile Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi

Emine Şule TECİRLİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Hanife SARI ERKAN

Küresel sürdürülebilirlik kapsamında kritik bir odak noktasında bulunan tekstil endüstrisi, yüksek kaynak tüketimi, kirlilik seviyeleri ve sera gazı emisyonları nedeniyle önemli çevresel etkileriyle bilinmektedir. Çevresel etkilerin değerlendirilmesi sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesini teşvik etmekte ve kaynak verimliliğini desteklemektedir. Yaşam Döngüsü Analizi (YDA), ürünlerin tüm yaşam döngüsünü inceleyerek çevresel etkileri değerlendirmek ve azaltmak için detaylı bir yaklaşım sunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında denim yıkama prosesinde kullanılan pomza taşının çevresel etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemek amacıyla YDA kullanılmış olup, proses kaynaklı elektrik ve su kullanımına ilişkin karbon ayak izi hesaplamalarına yer verilmiştir. Ayrıca bu araştırmada, pomza taşının sürdürülebilirliği, denim endüstrisinde kullanılan alternatif yöntemlerle karşılaştırılmış ve döngüsel ekonomi ilkelerine entegre öneriler sunularak sektör paydaşlarının denim üretiminde daha sürdürülebilir uygulamalara yönlendirilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında Yaşam Döngüsü Analizi kapsamında GaBi yazılım programının Ecoinvent v.3.7 sürümü kullanılmıştır. YDA sınırları içerisinde pomza taşının çevresel etkileri 14 farklı kategoride değerlendirilmiş olup pomza taşının Küresel Isınma Potansiyeli açısından $1,85 \cdot 10^5$ kg CO₂ eşdeğeri ile denim yıkama prosesine katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Proses kaynaklı elektrik tüketimi 27815 kg CO₂ eşdeğer ve su tüketimi 0,000101 kg CO₂ eşdeğer olarak hesaplanmıştır ve en düşük çevresel etkinin su kullanımından kaynaklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. YDA metodolojisiyle prodesteki yüksek enerji tüketimi ve çevresel etki değeri belirlenmiş ve elde edilen veriler ışığında, denim üretiminin ilk aşaması olan taş ile yıkamada kullanılan geleneksel pomza taşının yerine F-Stone (Köpük Taşı) gibi sürdürülebilir ve yenilikçi bir sentetik malzemenin tercih edilmesiyle daha az elektrik ve su kullanımının söz konusu olacağı tespit edilmiştir. Ayrıca F-Stone kullanımı ile denim üretim adımları esnasında oluşan atıksu çamurunun oluşumu söz konusu olmayacağından çevresel etkinin azaltılmasının destekleneceği ve tekstil endüstrisindeki döngüsel ekonomi yaklaşımının benimsenmesine katkı sağlanacağı saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kot yıkama, pomza taşı, sürdürülebilirlik, döngüsel ekonomi, yaşam döngüsü analizi (YDA)

Evaluation of the Environmental Impacts of Pumice Stone Used in Denim Washing from the Perspective of Sustainability and Circular Economy through Life Cycle Analysis

Emine Sule TECIRLI

Department of Environmental Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hanife SARI ERKAN

A critical focus of global sustainability, the textile industry is known to have significant environmental impacts due to high resource consumption, pollution and greenhouse gas emissions. The assessment of environmental impacts encourages the adoption of sustainable practices and supports resource efficiency. Life Cycle Analysis (LCA) provides a detailed approach to assessing and mitigating environmental impacts by analysing the entire life cycle of products. In this thesis, LCA was used to comprehensively examine the environmental impacts of pumice stone used in the denim washing process, including carbon footprint calculations related to the use of electricity and water in the process. In addition, this research compares the sustainability of pumice stone with alternative methods used in the denim industry and aims to guide stakeholders in the sector towards more sustainable practices in denim production by providing suggestions integrated with circular economy principles.

In the thesis, Ecoinvent v.3.7 version of GaBi software programme was used within the scope of Life Cycle Analysis. As part of the LCA, the environmental impact of pumice stone was assessed in 14 different categories, and it was found that pumice stone contributes 1.85×10^5 kg CO₂ equivalent in terms of global warming potential

to the denim washing process. Process electricity consumption was calculated at 27815 kg CO₂ equivalent and water consumption at 0.000101 kg CO₂ equivalent, and it was concluded that the lowest environmental impact was caused by water consumption. The LCA methodology identified high levels of energy consumption and environmental impact in the process and, in the light of the data obtained, it was determined that less electricity and water would be consumed by using a sustainable and innovative synthetic material such as F-Stone (Foam Stone) instead of the traditional pumice stone used in stone washing, the first stage of denim production. In addition, it was found that the use of F-Stone will help reduce environmental impact and contribute to the adoption of the circular economy approach in the textile industry by eliminating the wastewater sludge generated during the denim production steps.

Keywords: Denim washing, pumice stone, sustainability, circular economy, life cycle assessment (LCA)

1.1 Literatür özeti

Bu tez çalışması, özellikle kot yıkamada pomza taşının kullanımına odaklanarak tekstil endüstrisinin yarattığı çevresel zorlukları ele aldığı için oldukça önemlidir. Tekstil endüstrisi, kaynak yoğunluğu en fazla olan sektörlerden biri olup çevresel kirliliğe olduğu kadar, su ve enerji tüketimine de önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Volkanik patlamalar sonucunda oluşan pomza taşının volkanik yataklardan çıkarılmasından imhasına kadar olan aşamalarındaki çevresel etkilerinin Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) aracılığıyla değerlendirildiği bu tez çalışmasında, çevresel iyileştirme için kilit alanlar belirlenerek, denim endüstrisinde yaygın olarak kullanılan pomza taşının alternatif yöntemlerle karşılaştırılması ve küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu ve çevresel açıdan daha sorumlu bir moda endüstrisine geçişin desteklemeksi hedeflenmektedir.

Küresel ekonomide ekonomik ve sosyal açıdan önemli bir rol oynayan tekstil endüstrisi, kumaşların, giysilerin ve ilgili ürünlerin tasarımı, üretimi ve taşınmasıyla ilgilenmektedir [1]. Ekonomik açıdan, tekstil ve hazır giyim endüstrisi, özellikle gelişmekte olan ülkelerde ihracata yönelik sanayileşme ve ekonomik büyüme için önemli bir sektör olarak hizmet vermekte olup, ülkeye döviz kazancı sağlama, istihdam fırsatları yaratma ve ekonominin büyümesini destekleme potansiyeli nedeniyle öne çıkmaktadır [2] [3]. Sosyal açıdan ise tekstil sektörü, özellikle kadınlara önemli istihdam fırsatları sunarak yoksulluğu azaltmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde tekstil sektöründe çalışanların önemli bir kısmı kadınlardan oluşmakta olup, bu durum kadınların ekonomik ve sosyal olarak güçlenmesine katkı sağlamaktadır [4] [5]. Tekstil endüstrisi hem ekonomik hem de sosyal açıdan önemli faydalar sağlarken, çevresel sürdürülebilirlik açısından da dikkatle ele alınması gereken bir sektördür.

Tekstil üretimi, elyafların ipliğe, kumaşa ve giysiye dönüştürülmesi sürecidir. Bu süreçte hem doğal hem de sentetik elyaflar hammadde olarak kullanılır. Yüksek su ve enerji tüketimi, zararlı kimyasalların kullanımı ve yüksek miktarda atık nedeniyle tekstil endüstrisi çevre için en kirletici sektörlerden biridir [6] [7]. Bu endüstri, hammadde üretimi, tekstil üretimi ve kullanım aşaması ve kullanım ömrü boyunca su kirliliği, sera gazı emisyonları ve toprak bozulması gibi önemli çevresel sorunlara neden olur [8].

Denim, tekstil sektöründe dayanıklılığı ve rahatlığı ile bilinen çok yönlü bir pamuklu kumaştır [9]. Denim kumaşın görünümünü, boyutunu, konforunu ve modasını değiştiren önemli bir süreç, denim yıkamadır [10]. Taş yıkama, denimde yıpranmış bir görünüm elde etmek için yaygın olarak kullanılan geleneksel bir yöntemdir; ancak su ve kimyasal madde kullanımı nedeniyle çevresel açıdan zararlıdır [11] [12]. Enzim yıkama, selüloz gibi enzimler kullanılarak yapılan daha çevre dostu bir yöntemdir; ancak yine de su ve kimyasal madde gerektirir [13]. Ağartma, denimde renk açma işlemidir ve kimyasal yoğunluğu nedeniyle çevreyi kirletici bir işlemdir [9]. Ek olarak asit yıkama, kontrastlı görünüm elde etmek için kullanılmakta olup, kimyasal kullanımı sebebiyle çevreye zarar verir [14]. Günümüzde, bu geleneksel yöntemlerin çevre üzerindeki etkilerini azaltmak için yeni ve daha çevre dostu denim yıkama yöntemlerinin geliştirilmesi mümkündür. Bunlardan ilki olan ozon ile yıkama, su ve kimyasal kullanımını azaltırken, denimi yumuşatır ve beyazlatır [15]. Lazer yıkama yöntemi ise indigo boyayı denimden hassas bir şekilde ayırarak kimyasallar ve su kullanmadan karmaşık desenler oluşturmak için kullanılır [16]. Bunların yanı sıra E-Flow yıkama, hava, ozon ve buz kristallerini birleştirerek istenen yıkama etkilerini sağlarken, enzimik biyolojik yıkama daha az su ve enerji kullanarak daha çevre dostu bir alternative sunar [13] [17].

Taş ile yıkamada sıklıkla kullanılan pomza taşı, geleneksel taş yıkama sürecinde önemli bir rol oynamasına rağmen, bazı çevresel zararları vardır [18]. Bu yöntemde çok fazla su tüketilir ve kimyasal yüklü atık üretilirken, pomza taşlarının aşındırıcı etkisi denimi zayıflatarak mikrofibrin dökülmesine neden olur [19] [12]. Taş yıkama işleminin çamaşır makinelerine zarar vermesi ve yüksek işçilik maliyetleri gibi ekonomik dezavantajları da bulunmaktadır [20].

F-Stone, pomza taşına alternatif olarak denim yıkama işlemlerinde çevre dostu bir seçenek olarak öne çıkan sentetik bir taştır [21]. Bu taş, geri dönüştürülebilir malzemelerden yapıldığından, son derece dayanıklı ve etkilidir. Aynı zamanda su kullanımını önemli ölçüde azaltarak çevresel kirliliğe olan katkısını azaltmaktadır [22]. Ek olarak, kimyasalları absorbe etmediği için zararlı çamur oluşumunu engeller ve birden fazla kez kullanılabilme özelliği sayesinde daha verimli ve daha ekonomik hale gelir [23].

F-Stone, çevre dostu kimyasalların kullanımını teşvik ederek, tekstil endüstrisinde sürdürülebilirlik ve güvenlik standartlarını karşılamaktadır [24]. Çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik endişeleri nedeniyle, birçok ülke ve şirket su ve enerji tüketimini azaltmak için yeni teknolojilere yönelmektedir [25]. Modern denim yıkama yöntemlerinin odak noktası, sürdürülebilirlik ve ekolojik olarak sürdürülebilirlik olduğundan, bu sektördeki ilerlemeler hem çevresel hem de mali açıdan faydalıdır. Bu çerçevede, tekstil endüstrisinde denim yıkama süreçlerinin optimizasyonu, önemli bir araştırma ve geliştirme konusu olarak öne çıkmaktadır [26]. Sürdürülebilirlik, günümüzün ihtiyaçlarını karşılarken gelecek kuşakların ihtiyaçlarını tehlikeye atmamak için çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları kapsar [27]. Doğal kaynakların korunması, kirliliğin azaltılması ve ekolojik dengeyi sağlamak çevresel sürdürülebilirliğin amaçlarıdır [28]. Sosyal sürdürülebilirlik ise insanların temel ihtiyaçlarını karşılamak ve sosyal adaleti sağlamak anlamına gelirken, ekonomik sürdürülebilirlik kaynakların verimli kullanılmasını ve sorumlu ekonomik büyümeyi teşvik eder [29]. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (Sustainable Development Goals: SDG) kapsamında tekstil endüstrisinde sürdürülebilirlik uygulamaları, su ve enerji tüketiminin azaltılmasını ve çevresel etkileri azaltmayı içerir [30]. Bununla birlikte, tekstil endüstrisinin kullandığı dögüsel ekonomi yaklaşımları arasında atık geri dönüşümü, sürdürülebilir tasarım ve kapalı dögü üretim sistemleri yer almaktadır [31] [32] [33]. Paydaş işbirliği ve yenilikçi çözümler, bu yöntemlerle sürdürülebilirliği ve dögüsellliği teşvik eder [2].

Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri için yaygın olarak kullanılan YDA, bir ürünün, sürecin veya hizmetin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendiren bir yaklaşımdır [34]. Bu analiz, ürünün hammadde çıkarılmasından imha veya geri dönüşüm aşamalarına kadar olan her aşamada enerji tüketimi, su kullanımı, sera gazı emisyonları ve atık üretimini analiz ederek çevresel ayak izini belirler [35]. Beşikten Mezara veya Beşikten Beşiğe yaklaşımları, sürdürülebilirlik performansını artırmayı amaçlar [36] [37]. Bu bağlamda, tekstil endüstrisi YDA'yı ürün geliştirme süreçlerinden geri dönüşüm planlarına kadar çeşitli şekillerde kullanır [34]. Ayrıca, çevre dostu etiketleme, sertifikasyon ve malzeme seçiminde önemli bir rol oynar [38]. Yaşam döngüsü envanteri oluşturma, etki değerlendirmesi yapma ve sonuçları analiz etme gibi YDA uygulamalarında kullanılan kapsamlı bir modelleme aracı olarak GaBi yazılımı kullanılabilir [39]. Bu program, çeşitli sektörlerde sürdürülebilirlik stratejilerinin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır [40].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı kot yıkamada kullanılan pomza taşının çevresel etkilerini sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi ilkelerine odaklanarak Yaşam Döngüsü Analizi metodolojisi ile değerlendirmektir. Çalışmada enerji tüketimi, su kullanımı ve karbon emisyonları gibi hususlar da dahil olmak üzere pomza taşının çevresel ayak izinin tanımlanması ve ölçülmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca pomza taşının sürdürülebilirliği denim endüstrisinde kullanılan alternatif yöntemlerle karşılaştırılması ve döngüsel ekonomi uygulamalarının entegre edilmesine yönelik fırsatların araştırılması hedeflenmektedir. Tez çalışmasının nihai hedefi ise çevresel etkileri en aza indirecek ve tekstil sektöründe sürdürülebilir uygulamaları teşvik edecek uygulanabilir önerilerin sunulması ve sektörün ekolojik ayak izinin azaltılmasına katkıda bulunulmasıdır.

1.3 Hipotez

Çalışma kapsamında Çorlu/Tekirdağ'da yer alan denim üretim firmasının kot yıkama prosesinde kullanılan pomza taşının çevresel etkileri Yaşam Döngüsü Analizi ile değerlendirilecek olup, proses süresince tüketilen elektrik ve su verilerinin karbon ayak izi hesaplamaları değerlendirmeye dahil edilecektir. Ayrıca firmaya hazır halde gelen ham haldeki pantolonların denime dönüşüm sürecindeki ilk aşama olan kot yıkama prosesinde kullanılan pomza taşının nihai olarak yüksek hacimlerde atık çamur oluşturmamasının önüne geçebilmek için pomza taşına alternatif F-Stone'un sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi açısından uygunluğunun değerlendirilmesi yapılacaktır.



2

TEKSTİL ENDÜSTRİSİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

2.1 Tekstil Endüstrisinin Tanımı ve Önemi

Tekstil endüstrileri, kumaşların, elbiselerin ve ilgili ürünlerin tasarımı, üretimi ve dağıtımıyla ilgilenen endüstrileri ifade eden en eski endüstri modellerinden biridir [1]. Tekstil endüstrisi küresel ekonomide hem ekonomik hem de sosyal açıdan önemli bir rol oynamaktadır. Tekstil sektörünün önemini vurgulayan noktalar ekonomik ve sosyal önem olarak iki farklı açıdan ele alınabilir.

2.1.1 Ekonomik Önem

Tekstil ve hazır giyim endüstrisi, dünya çapında en büyük ihracat endüstrilerinden biridir ve başta gelişmekte olan ülkeler olmak üzere birçok ülkenin imalat sektörüne ve Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYİH)'ya önemli ölçüde katkı sağlamaktadır [2]. Bu endüstri, ülkelere ihracata yönelik sanayileşme ve ekonomik kalkınmaya giriş noktası sağlayan bir "başlangıç" sanayi görevi görmektedir. Tekstil sektörü döviz kazancı yaratma, istihdam fırsatları yaratma ve ekonomik büyümeyi destekleme potansiyeline sahiptir [3]. Tekstil endüstrisinin tarım (pamuk, jüt vb.), kimyasallar ve makineler gibi diğer sektörlerle güçlü bağları vardır ve bu bağlar çeşitli endüstrilerdeki ekonomik faaliyetleri yönlendirmektedir. Tekstil endüstrisi küresel değer zincirlerine ve üretim ağlarına katılım yoluyla teknolojik yükseltme fırsatları ile ekonomiye katkı sağlamaktadır [4]. Dünya çapında en sıkı rekabetin olduğu tekstil sektöründe arz-talep dengesindeki hızlı gelişim de bu rekabeti desteklemektedir. Bu kapsamda sektörde markalaşmanın önemi her geçen gün artarken, bu değişim Türkiye ekonomisine de önemli ölçüde olumlu katkı sağlamakta ve farklı sektörler ile pozitif yöndeki etkileşimi göz önüne alındığında rekabetin sürdürülebilirliği sağlanmaktadır [41].

2.1.2 Sosyal Önem

Tekstil sektörü, istihdam yaratmanın ötesinde önemli sosyal faydalar sunmaktadır. Tekstil ve hazır giyim endüstrisinin sosyal yönleri maaşlar, çalışma şartları, çalışanların cinsiyeti ve yoksulluğu azaltma stratejileri açısından değerlendirilmektedir [4].

Tekstil endüstrisi, özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki kadınlar için, gelir fırsatları sağlayan ve yoksulluğun azaltılmasına katkıda bulunan önemli bir istihdam kaynağıdır. Sektör, ev dışında istihdam olanakları sağlayarak kadınları ekonomik ve sosyal açıdan güçlendirme potansiyeline sahiptir [5]. Gelişmekte olan ülkelerdeki ücretlerin gelişmiş ülkelere göre daha düşük olmasına ve çalışma ücretlerindeki cinsiyet ayrımına rağmen, istihdam düzeyleri kadınların lehinedir ve sektörde önemli oranda genç kadın işçi bulunmaktadır [42]. Ünlütürk ve Öngel [43] tarafından gerçekleştirilen tekstil sektöründe çalışan işçilerin demografik profilinin analizinin yapıldığı çalışmada, Türkiye'deki tekstil sektöründe çalışanların %54'nün kadın ve %46'sının erkek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum, Türkiye'de kadınlar için tekstil sektörünün önemli bir gelir kaynağı olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, tekstil endüstrisi birçok ülkenin ekonomisinde hayati bir rol oynamakta; sanayileşme, istihdam yaratma ve ekonomik büyüme için itici bir güç oluştururken, aynı zamanda sorumlu uygulamalar ve politikalar aracılığıyla ele alınması gereken sosyal zorlukları da beraberinde getirmektedir.

2.2 Tekstil Endüstrisinin Üretim Prosesi

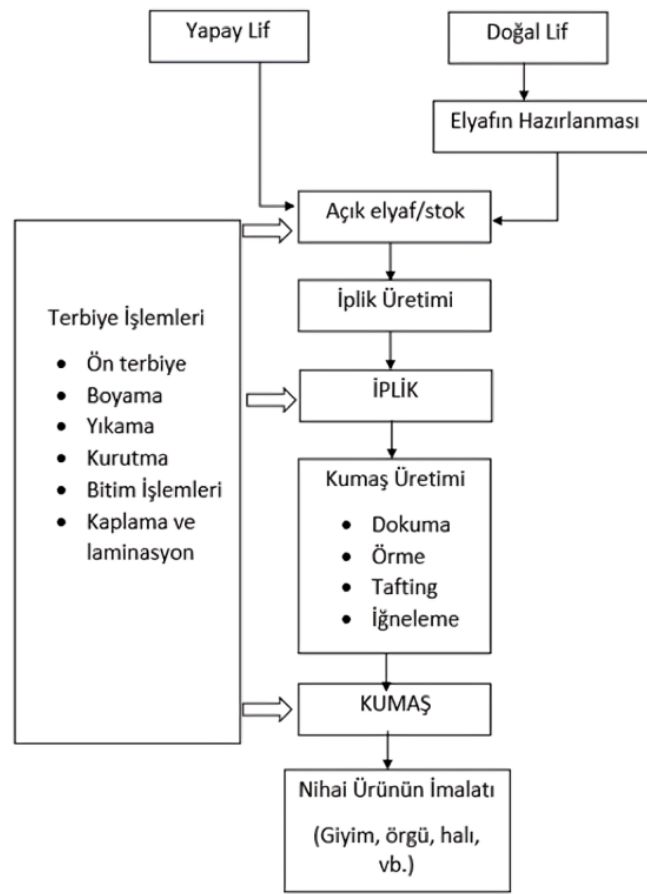
Tekstil üretimi, elyafları ipliğe, ardından kumaşa ve giysiye dönüştürerek çeşitli işlemlerle değer katmaktadır. Başlangıçta doğal elyaflara dayanan iplik üretiminde günümüzde yaygın olarak sentetik elyaflar kullanılmakta olup, nihai kumaşın amaçlanan kullanım özelliklerine göre değişiklik göstermektedir [6]. Günümüzde tekstil endüstrisi, iplik yapımı, giysi dikişi, kumaş kabartması ve kompozit üretimi gibi önemli çeşitlilikte prosesi kapsamaktadır.

Ancak tekstil elyafının herhangi bir tekstil ürününün temel yapı birimi olduğu düşünüldüğünde, tekstil imalatı açıkça geleneksel ve teknik tekstiller olarak tanımlanabilir [44].

Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi, tekstil üretimi, elyafların pamuk, yün gibi doğal kaynaklardan veya polyester, naylon gibi sentetik kaynaklardan elde edilmesiyle başlar [45]. Pamuk, yün ve ipek gibi doğal lifler bitkilerden ve hayvanlardan elde edilir. Örneğin, pamuk, tohumları ve yabancı maddeleri çıkarmak için çırçırılama yoluyla hasat edilir ve işlenirken, yün koyunlardan kesilir, temizlenir ve taranır. Polyester ve naylon gibi sentetik elyaflar ise petrokimyasallardan polimerizasyon yoluyla üretilir ve bu da iplik haline getirilebilen elyaflarla sonuçlanır [44].

Lifler üretildikten sonra, bunlar ipliğe dönüştürmek için bir dizi işlemde geçerler. Başlangıçta, lifler istenen özellikleri elde etmek için harmanlanır; daha sonra çözölmeleri ve sürekli bir ağ veya şerit halinde hizalanmaları için taranırlar. Bunu takiben, elyaf hizalamasını geliştirmek için şeritler birleştirilir ve gerilir. Son olarak, eğirme işlemiyle fitiller iplik haline getirilir ve gerekli mukavemet ve tutarlılık sağlanarak güçlü iplikler oluşturulur [46]. İplik üretimi sarım ve büküm işlemleriyle devam etmektedir. Eğrilmiş iplikler, kullanım kolaylığı ve daha sonraki işlemler için konilere veya makaralara sarılır. Büküm, birden fazla ipliğin birleştirilmesini ve tekli ipliklerden daha güçlü ve daha iyi performans özelliklerine sahip olan katlı iplikler oluşturmak için bunları birlikte bükmeyi içermektedir [47]. İplikler dokuma, örme veya dokunmamış yapılar oluşturma yoluyla kumaşa dönüştürülür. Bir dokuma tezgahında ipliklerin birbirine geçmesi, iğnelerle ara ilmekli ipliklerin örülmesi ve dokunmamış işlemler, elyafları birbirine bağlar [48]. Kumaşlara renk ve desen eklemek için boyama ve baskı işlemleri yapılır. Boyama işleminde kumaşlar boya banyolarına batırılırken, baskı işleminde ise serigrafi ve dijital baskı gibi yöntemler kullanılarak çeşitli tasarımlar uygulanır. Bu işlemler, tekstil ürünlerinin estetik çekiciliğini ve pazarlanabilirliğini artırarak geniş bir renk ve desen yelpazesine olanak tanımaktadır [49]. Terbiye aşaması, kumaşın dokusunu, görünümünü ve işlevselliğini geliştirmek için mekanik ve kimyasal işlemleri içerir. Fırçalama, kesme, perdahlama ve sanforlama gibi mekanik bitirme işlemleri kumaşın tuşe hissini ve dökümlülüğünü artırırken, kimyasal işlemler su geçirmezlik, alev geciktirici, anti-statik özellikler ve kırışma direnci gibi özellikler için uygulanır [50].

Kumaşın tutarlılığını ve güvenilirliğini korumak için kalite standartları gereğince kontrol edilmesinden sonra kumaş manuel veya otomatik yöntemler kullanılarak istenilen modele uygun olarak kesilir. Kesilen parçalar, düğmelerin, fermuarların ve etiketlerin eklenmesini içeren kırpma gibi ek adımlarla endüstriyel dikiş işlemleri yoluyla giysi haline getirilmektedir [51]. Son olarak hazır olan giysiler nakliye için katlanır, etiketlenir ve paketlenir. Etkin paketleme ve dağıtım sistemleri, giysilerin pazara iyi durumda ve zamanında ulaşması, talebin karşılanması ve müşteri memnuniyetinin sürdürülmesi açısından büyük önem taşımaktadır [44].



Şekil 2.1 Tekstil sektörü üretim prosesi [52]

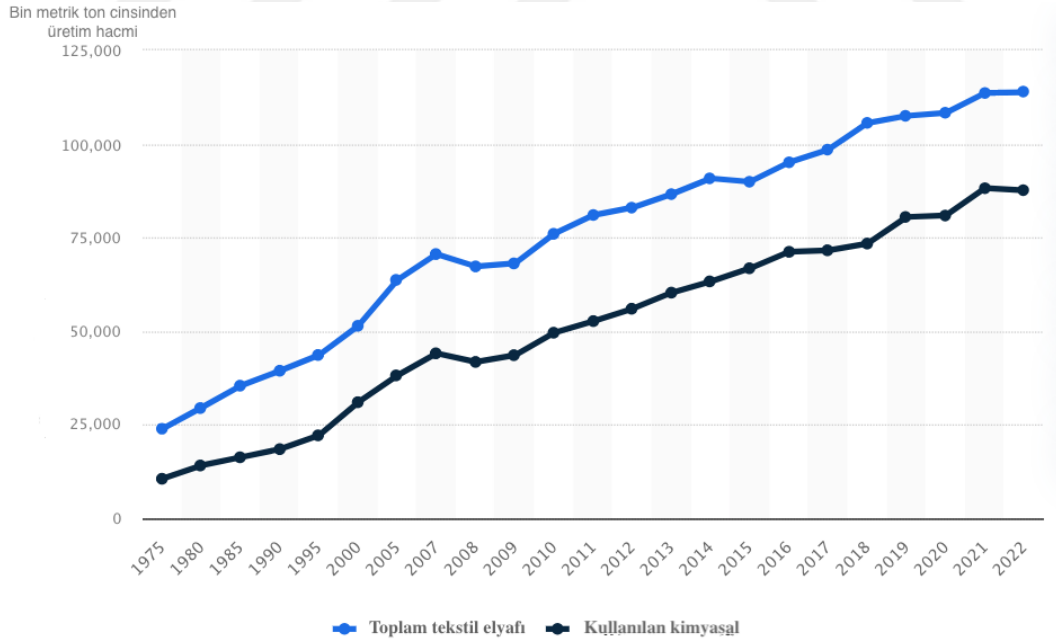
Tekstil üretim zincirinin tamamı, birbirine bağımlı aşamalar arasında yakın koordinasyon gerektiren, belirli süreçlerde uzmanlaşmış farklı şirketlerle yürütülmektedir [47].

2.3 Tekstil Endüstrisinin Çevresel Etkileri

Tekstil endüstrisi; zararlı kimyasalların kullanımı, yüksek su ve enerji tüketimi, büyük miktarda katı ve gazlı atık oluşumu, nakliye için aşırı yakıt tüketimi ve biyolojik olarak parçalanamayan ambalaj malzemelerinin kullanımı sebebiyle dünyadaki ekolojik açıdan en kirletici endüstrilerden biri olarak kabul edilmektedir [7]. Tekstil endüstrisinin çevresel etkileri bir kaç başlık altında değerlendirilmektedir. Bunlar; hammadde üretimi, tekstil imalatı, kullanım aşaması ve kullanım ömrüdür.

2.3.1 Hammadde Üretimi

Tekstil endüstrisinin başlıca hammadde kaynakları pamuk, yün ve polyesterden oluşmaktadır. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere, 1975 yılında dünya çapında yaklaşık 24 milyon metrik ton tekstil elyafı üretilirken, 2022 yılına gelindiğinde bu rakam neredeyse beş katına çıkarak 113,8 milyon metrik tonu aşmaktadır. Bu üretim hacminin 25,2 milyon metrik tonu pamuk veya yün gibi doğal elyaflardan oluşurken, geri kalan 87,6 milyon tonun kimyasal elyaflardan oluştuğu gözlemlenmektedir [53].



Şekil 2.2 1975'ten 2022'ye kadar dünya çapında kimyasal ve tekstil elyaflarının üretim hacmi (1000 metrik ton olarak) [53]

Pamuk ekimi su tüketiminin yoğun olduğu bir proses olup, çoğu zaman aşırı pestisit ve gübre kullanımına dayanmaktadır. Bu da su kirliliğine, toprağın bozulmasına, yeraltı suyu kaynaklarının kontaminasyonuna ve biyolojik çeşitlilik kaybına yol açmaktadır [8]. Yün üretimi, koyun yetiştiriciliği faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarına ve su kirliliğine katkıda bulunmaktadır [54]. Polyester gibi sentetik elyaflar ise yenilenemeyen fosil yakıtlardan elde edilmekte olup, bu tür elyafların üretimi yüksek sera gazı emisyonlarının yayılmasına ve tehlikeli atıkların oluşmasına sebep olmaktadır [55].

2.3.2 Tekstil İmalatı

Boyama ve terbiye işlemleri büyük miktarda su, kimyasal madde ve enerji tüketerek su kirliliğine ve sera gazı emisyonlarına neden olmaktadır. Küresel endüstriyel su kirliliğinin yaklaşık %20'si tekstil endüstrisinde kullanılan boyalar ve terbiye maddelerinden kaynaklanmakta olup, bu endüstri, dünya çapındaki önemli bir su tüketicisidir [56]. Haşıl sökme, temizleme, ağartma ve mercerizasyon gibi ıslak işleme işlemleri, toksik maddeler içeren önemli miktarda atıksu ve atık çamur oluşturmaktadır [57]. Arıtılmamış veya giderim verimi yüksek seviyede arıtılmamış tekstil atıksuları, doğal ekosistemi olumsuz etkileyerek ve uzun vadeli sağlık etkilerine neden olarak hem sudaki hem de karadaki yaşam için zararlı olabilmektedir [58].

2.3.3 Kullanım Aşaması

Tekstil ürünlerinin yıkanması, kurutulması ve ütülenmesi evlerde önemli miktarda enerji ve su kaynağı tüketmektedir [59]. Sentetik tekstiller yıkama sırasında mikroplastikleri su kütlelerine salarak plastik kirliliğine katkıda bulunurken yıkama sırasında kullanılan deterjanlardan kaynaklanan kimyasallar çevreyi önemli derecede etkilemektedir [60]. Sıklıkla kullanım ve yıpranma tekstil atıklarını artırırken, ütüleme ve kuru temizleme ise daha fazla enerji ve kimyasal kullanımına neden olmaktadır [61].

2.3.4 Kullanım Ömrü

Kullanım ömrünü tamamlamış tekstiller, sahiplerinin artık ihtiyaç duymadığı veya istemediği tekstil ürünlerini ifade etmektedir. Bu tanıma hem hala iyi durumda olan yeniden kullanılabilir tekstil ürünleri hem de hasar görmüş veya yıpranmış tekstil atıkları dahildir [62].

Çoğu tekstil atığı çöplüklere atılmakta veya yakılmakta olup, bu durum sera gazı emisyonlarına, potansiyel toprak ve su kirliliğine yol açmaktadır [63]. Tekstil atıkları geri dönüşüm oranları çok düşük atıklar olup, kullanılmış giysilerin yalnızca %1'i yeni giysilere dönüştürülmektedir [64]. AB Atık Direktifi ile 2025 yılına kadar tekstil ürünlerinin ayrı toplanması zorunlu hale getirilecek olup özel gereklilikler, örneğin toplama noktalarının sayısı, hala belirsizdir [65].



3

KOT YIKAMA PROSESİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

3.1 Kot Yıkama Prosesi

Denim, tipik olarak indigo ile boyanmış, ayırt edici bir çapraz fitil deseni ile karakterize edilen, dayanıklılığı, rahatlığı ve farklı görünümüyle bilinen çok yönlü pamuklu bir kumaştır. Uygulama alanları günlük kot pantolonlardan son moda ürünlere kadar uzanan denim ürünleri, tekstil endüstrisinde zamansız bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır [9].

Dünya pazarında özellikle denim giysi yıkamanın popülaritesi her geçen gün artmaktadır [66]. Kot yıkama teknolojisi, giysilerin görünümünü, boyutunu, görünüşünü, konfor kabiliyetini ve modasını değiştirmek için kullanılır. Kot boyama işlemi görünüm ve rahatlık üzerindeki etkisi nedeniyle en yaygın kullanılan terbiye işlemlerinden biri olup, denim giysinin dokuma, baskı ve boyama efektleri nedeniyle yıkanmadan giyilmesi rahatsızlık vericidir [10].

Üretim sürecinde denimin yıkanması birkaç temel nedenden dolayı önemlidir. Öncelikle yıkama işlemi solmuş, yıpranmış bir görünüm ve daha yumuşak bir his yaratır. Taş yıkama, enzim yıkama ve elle kazıma gibi teknikler, denim kumaşın kasıtlı olarak solmasını ve yıpranmasını sağlayarak zamanla oluşan doğal aşınma ve eskime sürecini taklit eder [67]. Bu durum, denim pantolonlar ve diğer giysiler için popüler olan arzu edilen vintage, yaşanmış estetiğin ortaya çıkmasına neden olur. Bu yıkama işlemlerinden kaynaklanan aşınma aynı zamanda denim liflerinin parçalanmasına ve yumuşamasına yardımcı olarak kumaşın daha esnek ve giyiminin daha rahat olmasını sağlamaktadır [68].

Denim yıkamanın diğer bir sebebi ise yıkama işleminin renk haslığını artırması ve çatlamayı (renk aktarımı) önlemesidir. Ham, yıkanmamış denim, diğer yüzeylere sürtüldüğünde aşırı indigo boya aktarımına maruz kalmaktadır. Yıkama, boyanın sabitlenmesine ve bu sorunun azaltılmasına yardımcı olarak rengin sabit kalmasını sağlamaktadır [69].

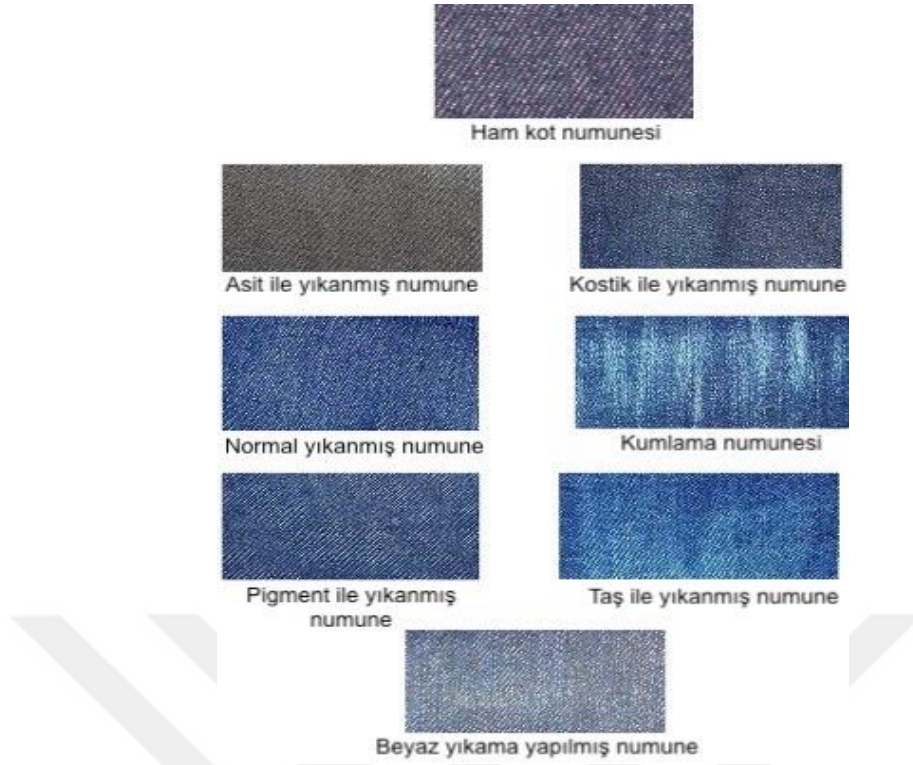
Bu adım aynı zamanda denimin renk haslığını da arttırarak tüketicinin gelecekteki yıkama ve giyme sırasında aşırı solmasını veya renk kaybını önlemektedir [11].

Denim yıkama, moda trendlerinin ve tüketici tercihlerinin karşılanması açısından da büyük önem taşımaktadır. Çok çeşitli yıkanmış efektler ve yüzeyler oluşturma yeteneği, üreticilerin hızla değişen moda trendlerine ayak uydurmasını ve farklı tüketici taleplerini karşılamasını sağlamaktadır [70].

Özetle denim yıkama, kumaşın yumuşaklığını arttırmak, renk haslığını arttırmak, çatlamayı azaltmak ve moda trendlerini karşılamak dahil olmak üzere birçok amaca hizmet eder. Aynı zamanda giysinin uyumunu ve sağlamlığını da sağlayarak arzu edilen ve işlevsel denim giysinin üretiminde çok önemli bir adımdır.

3.2 Kot Yıkama Yöntemleri

Denim giysilerin istenen görünüm ve hissine ulaşması için denim yıkama çok önemlidir. Geçmişten günümüze pek çok farklı denim yıkama teknikleri geliştirilmiş olup, Şekil 3.1’de farklı yıkama tekniklerine ait denim yıkama sonuçları yer almaktadır. Geleneksel yöntemler etkili olmasına rağmen su tüketimi, kimyasal kullanımı ve atık oluşumu nedeniyle çevresel kaygıları artırmıştır. Bu sebeple denim kalitesini korurken çevresel etkiyi en aza indirmeyi amaçlayan modern çevre dostu yaklaşımlar, sürdürülebilir alternatifler olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.1 Farklı yıkama yöntemleri sonucu denim görüntüleri [71]

3.2.1 Geleneksel Kot Yıkama Yöntemleri

Geleneksel kot yıkama teknikleri kendi içerisinde taş ile yıkama, enzim ile yıkama, ağartma ve asit ile yıkama olarak dört ayrı kategoride değerlendirilmektedir.

3.2.1.1 Taş ile yıkama

Bu yöntem denim giysilerde yıkanmış bir görünüm elde etmek için en yaygın ve temel işlemdir [11]. Taş ile yıkama işleminde soluk, yıpranmış bir görünüm oluşturmak için denim giysilerin yıkanması esnasında pomza taşları ve kimyasallar kullanılmaktadır [72]. Bu işlem önemli miktarda katı atık (taş kalıntıları) ve kimyasal yüklü atıksu üretmektedir [12]. Pomza taşı hakkında detaylı bilgi Bölüm 3.3'te detaylı olarak verilmiştir.

3.2.1.2 Enzim ile yıkama

Tekstil endüstrisinde denime yıpranmış bir görünüm kazandırmak için en yaygın kullanılan enzimler arasında alfa amilazlar, proteazlar, selülozlar ve katalazlar bulunmaktadır. Enzimler, mevcut apre çeşitlerini artırarak denim aprelemede yeni olanakların önünü açmıştır [11].

Selülaz gibi enzimler denim yıkamada kullanılan yaygın enzimlerden olup, denim kumaşın yüzeyini parçalayarak solmuş ve yumuşamış bir etki yaratmak için kullanılır. Taş yıkamaya göre daha çevre dostu olmasına rağmen yine de suya ihtiyaç duymaktadır ve enzimlerle birlikte kimyasallar içeren atıksu oluşturmaktadır [13].

3.2.1.3 Ağartma

Ağartmanın amacı, indigo boya moleküllerini oksidatif ağartma kimyasalları ile yok ederek koyu mavi tonu renksizleştirmektir [11]. Bu teknik, benzersiz desen ve tasarımlar oluşturmak için genel olarak veya belirli alanlarda uygulanabilir. Ağartıcı yıkama, hafif renk aydınlatmadan koyu kontrastlara kadar çok çeşitli görünümler üretebilen çok yönlü bir yöntemdir [9]. Denim, soluk veya ağartılmış bir görünüm elde etmek için hipoklorit veya potasyum permanganat gibi ağartma maddeleri ile işlenir. Bu işlem oldukça yoğun kimyasal içermekte olup, çevresel kirlilik potansiyeli yüksek atıksu üretmektedir [72].

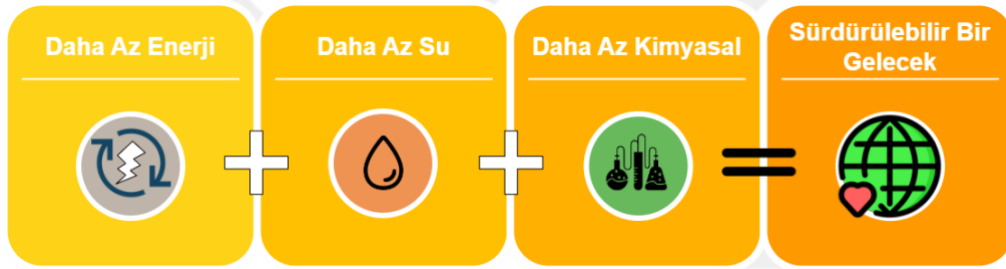
3.2.1.4 Asit ile yıkama

Denim pantolonlarda asit yıkama, önemli kontrastları ve çekici renk görünümü nedeniyle çok popüler hale gelmiştir. Asit yıkama, kotun üst katmanını soyarak beyaz bir yüzey oluştururken, renk malzemenin alt katmanlarında kalarak ona soluk bir görünüm veren kimyasal bir yıkama işlemidir. Denimde oluşturduğu yoğun kontrastlar ve çekici renk görünümü nedeniyle bugünlerde oldukça popülerdir [14]. Bu yönetmede denim, benekli veya çizgili bir etki yaratmak için potasyum permanganat ve oksalik asit gibi kimyasallarla işlenir. Bu işlem sonucunda kimyasal yüklü atıksu üretilmektedir [13].

3.2.2 Modern ve Çevre Dostu Kot Yıkama Yöntemleri

Büyük miktarda su tüketen, zararlı kimyasallar kullanan ve önemli miktarda atık üreten geleneksel yöntemlerin çevresel etkilerini azaltmak için modern ve çevre dostu denim yıkama tekniklerinin kullanımına olan ilgi günümüzde artmaktadır [73]. Bu sürdürülebilir teknikler, kaynakların korunmasına, kirliliğin azaltılmasına ve çevreye duyarlı üretimi teşvik etmeye yardımcı olmaktadır. Sürdürülebilir denim yıkama için önemli parametreleri Şekil 3.2’de özet olarak gösterilmekte olup detaylı olarak şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Sürdürülebilir bir gezegen için daha az su tüketimi,
- Üretilen atıksuyun en aza indirilmesi,
- Suyun yeniden kullanımı,
- Sürdürülebilir bir gelecek için daha az kimyasal kullanımı,
- Üretimde çevre dostu kimyasal ve malzemelerin kullanılması,
- Verimli üretim için daha az enerji kullanımı,
- İnsan sağlığının korunması,
- Daha kısa üretim süreçleri,
- Proses optimizasyonu,
- Üretim kalitesinin iyileştirilmesi,
- Verimliliğin artırılması,
- Yıkama ekipmanının ömrünün korunması [74].



Şekil 3.2 Sürdürülebilir kot yıkama için önemli parametreler [75]

3.2.2.1 Ozon ile Yıkama

Denimi su veya kimyasal madde kullanmadan beyazlatmak ve yumuşatmak için ozon gazı kullanılarak su, kimyasal ve enerji kullanımı azaltılmaktadır [15]. Ozon bazlı denim terbiyesi, gölgelendirme, taş yıkama ve diğer terbiye işlemleri açısından diğer modern denim yıkama tekniklerini geride bırakan basit ve çevre dostu bir yöntemdir. Çalışmalar, yüksek su ve kimyasal verimliliği, düşük üretim maliyetleri ve yüksek kapasite nedeniyle sürdürülebilirliğinin altını çizmektedir [76].

3.2.2.2 Lazer ile Yıkama

Lazerler, indigo boyayı denimden hassas bir şekilde ayırmak için kullanılırken, su veya kimyasal madde olmadan karmaşık soluk desenler oluşturulur. Bu sayede lazer yıkama, minimum çevresel etkiye sahip kuru bir işlemdir [16].

Bu yöntem, denim yıkamada son derece verimli olup, hassas tasarım kontrolü, daha hızlı üretim ve tutarlı kalite sunmaktadır. Ayrıca kumaş hasarını en aza indirerek malzeme dayanıklılığını korur. Genel olarak lazer yıkama, hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlayarak sürdürülebilir üretim hedefleriyle uyumludur [77].

3.2.2.3 Enzimatik biyolojik yıkama

Enzimatik biyolojik yıkama, denim ve diğer kumaşlarda yıkanmış ve yıpranmış bir görünüm elde etmek için doğal enzimler kullanan çevre dostu bir tekstil işleme sürecidir. Bu yöntem, kumaşa uygulanan selüloz liflerini parçalayan selüloz gibi enzimlerin kullanılmasını içerir; bu sayede daha pürüzsüz bir doku ve soluk bir görünüm elde edilir [70]. Avantajları arasında daha az su ve enerji tüketimi, minimum düzeyde kimyasal kullanımı ve gelişmiş kumaş yumuşaklığı ve rahatlığı yer almaktadır. Enzimatik biyolojik yıkama, tekstil üretiminde hem çevresel hem de kalite iyileştirmeleri sunan, geleneksel yıkama tekniklerine sürdürülebilir bir alternatiftir [17].

3.2.2.4 E-Flow yıkama

E-Flow yıkama yenilikçi bir teknik olup denim üzerinde eskimiş görünümler yaratmak için hava, ozon ve buz kristallerini birleştirir. E-Flow teknolojisi, kumaşa verimli bir şekilde nüfuz eden nano boyutlu su ve kimyasal kabarcıklarını dağıtmak için havayı kullanır ve minimum su kullanımıyla istenen etkileri elde eder.

Ozon ve buz kristallerinin dahil edilmesi süreci iyileştirir, enerji tüketimini ve kimyasal kirliliği azaltır. E-Flow yıkama, verimliliği ve azaltılmış çevresel etkisi ile bilinir ve bu da onu geleneksel yöntemlere sürdürülebilir bir alternatif haline getirir [13].

3.2.2.5 Köpük boyama

Köpük boyama, denim yıkamada kullanılan, boyayı uygulamak için köpük bazlı bir ortam kullanan teknik olup, boyayı stabil bir köpük halinde dağıtarak boyanın yeniden kullanımına izin veren bir yöntemdir [13]. Avantajları arasında %80'e kadar daha az su kullanımı, daha az kimyasal madde, daha düşük enerji gereksinimi ve tutarlı renk uygulaması yer alır. Bu yöntem maliyet tasarrufu sağlarken sürdürülebilir üretim uygulamalarıyla uyumlu olup, denim endüstrisinde hem çevresel hem de ekonomik avantajlar sağlamaktadır [78].

Yukarıda yer alan modern yıkama teknolojilerinin yanı sıra F-Stone yıkama prosesi de diğer bir yenilikçi ve sürdürülebilir yıkama tekniği olup, detaylı incelemesi Bölüm 7.3.1’de verilecektir.

3.3 Kot Yıkamada Pomza Taşının Yeri

Pomza taşı, geleneksel denim yıkamada, özellikle denim giysilerde yıpranmış, eskimiş bir görünüm yaratmak için kritik bir rol oynamaktadır [18]. Pomza taşları büyük miktarda su ve sodyum hipoklorit, potasyum permanganat ve enzimler gibi kimyasallarla birlikte kullanılmaktadır. Pek çok farklı bileşikten oluşan pomza taşlarının kimyasal bileşimi Tablo 3.1’de yer almaktadır. Taşların aşındırıcı etkisi denimde soluk, yıpranmış bir görünüm yaratmaktadır [12]. Bu aşındırıcı etki, kot pantolona tüketiciler arasında popüler olan arzu edilen “yıpranmış” vintage görünümü kazandırmaktadır [19].

Taş yıkama işleminde, yeni boyanmış kot pantolonlar büyük çamaşır makinelerine yüklenir ve yumuşak bir tuşe ve arzu edilen bir görünüm elde etmek için pomza taşları ile tamburlanır. Şekil 3.3’te görüldüğü gibi, bileşim, sertlik, boyut, şekil ve gözeneklilikteki farklılıklar bu taşları çok yönlü kılmaktadır [14].



Şekil 3.3 Kot yıkama işleminde kullanılan pomza taşları

Pomza taşı geleneksel olarak denim kot pantolonların taş yıkama işleminde önemli bir rol oynamıştır, ancak önemli çevresel dezavantajlara sahiptir.

Pomza taşı ile yıkama işleminde oldukça yoğun miktarda su kullanılmakta olup, her bir pomza taşı ile denim yıkama işleminde 70 L'ye kadar su tüketilmektedir [19]. Yıkama sonunda boyar madde, haşıl maddeleri ve taş kalıntıları içeren büyük miktarlarda kimyasal yüklü atıksu üreterek su kirliliğine katkıda bulunurlar [79].

Pomza taşı kullanımındaki diğer bir sorun ise taşların parçalanıp “çamur” olarak adlandırılmasıdır. Bu, tamamen çivit mavisi renkli ve yıkama işleminden kaynaklanan kimyasalların absorbe edilmesiyle oluşan bir tür atık çamurdur. Bu çamur tehlikeli atıktır ve uygun bir şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir [80].

Tablo 3. 1 Pomza taşının kimyasal bileşimi [81]

Kimyasal	Ağırlıkça yüzde (% w/w)
Silikon dioksit (SiO_2)	68.4 – 71.6
Alüminyum oksit (Al_2O_3)	11.3 – 11.7
Ferrik oksit (Fe_2O_3)	1.1 – 1.2
Kalsiyum oksit (CaO)	0.7 – 2.6
Magnezyum oksit (MgO)	0.2 – 0.7
Kükürt trioksit (SO_3) 0,0 – 0,1	0.0 – 0.1
Potasyum oksit (K_2O)	4.0 – 4.3
Sodyum oksit (Na_2O)	3.4 – 3.7
Kireçlenme kaybı 5,3 – 7,0	5.3 – 7.0
Tanımlanamayan içerik	0.2

Atıksu genellikle, uygun şekilde arıtılmadığı takdirde sudaki yaşama zarar verebilecek potasyum permanganat gibi toksik maddeler içermekte olup, pomza taşlarının aşındırıcı etkisi denim kumaşı zayıflatarak zarar verir ve kullanım ve yıkama sırasında mikrofiber dökülmesinin artmasına neden olur [12] [13].

Pomza taşının çevresel etkilerinin yanı sıra, üretilen pomza taşı ve toz parçacıklarının işçiler tarafından giysi ve makinelerden fiziksel olarak uzaklaştırılması yüksek işçilik maliyetleri ve makinelerin zarar görmesi gibi ekonomik dezavantajlar oluşturmaktadır [20]. Pomza taşının denim yıkamada kullanılmasındaki önemli bir diğer sorun, çok hızlı aşınmalarıdır.

60 dakikalık yıkamanın ardından neredeyse yarı boyutuna ulaşırlar ve bu, her yükleme için için yeni pomza taşlarına ihtiyaç duyulduğu anlamına gelmekte olup taşın madencilik, işleme ve nakliyeden kaynaklı yüksek enerji tüketimi kullanımı ile birlikte gelmektedir [80]. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi yıkamadan önce (solda) ve 1 saatlik yıkamadan sonra (sağda) geleneksel pomza taşları yer almaktadır.

Pomza taşları ile yapılan geleneksel taş yıkama, istenen yıpranmış görünümü elde etmede etkili olmasına rağmen, taşların çıkarılması zorluğu, kumaş hasarı, makine tıkanıklığı ve pomza taşlarının birden fazla yıkamadan sonra bozularak kullanılamaz hale gelmesi gibi sorunlar nedeniyle önemli miktarda atık üretimine yol açmaktadır [82]. Kullanılmış pomza taşları yıkandıktan sonra boyalar ve kimyasallarla kirlenir, bu da bertarafı zorlaştırır. Oluşan atık pomza taşının bertarafı sırasında toprağın ve yeraltı suyunun kirlenmesine neden olabilir ve potansiyel kontaminasyon nedeniyle geri dönüşümü oldukça zorlaşır [83]. Tekstil ve hazır giyim sektörünün çevresel etkilerinin azaltılmasında sürdürülebilirlik, ürün yaşam döngüsü ve ekolojik üretim kavramları hayati önem taşımaktadır [82]. Bu endişeleri gidermek için birçok ülke ve şirket, su ve enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltacak yenilikçi teknolojiler benimsemektedir [25].



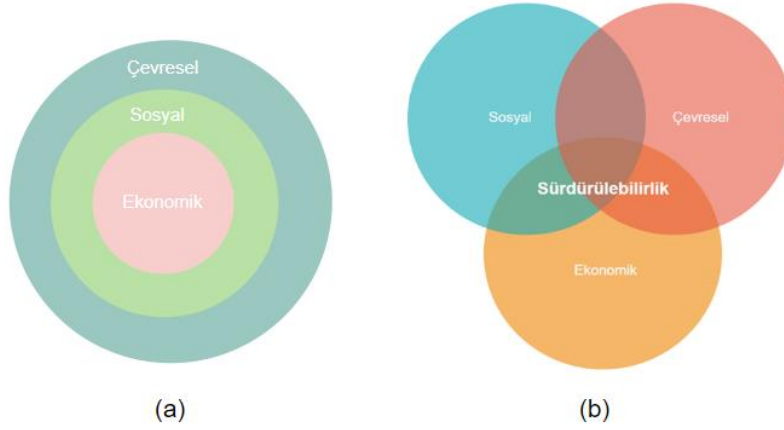
Şekil 3.4 Yıkamada kullanılmadan önce ve sonra pomza taşının değişimi [80]

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK, DÖNGÜSEL EKONOMİ VE TEKSTİL ENDÜSTRİSİ

4.1 Sürdürülebilirlik Kavramı ve Önemi

Sürdürülebilirlik, gelecek kuşakların kendi ihtiyaçlarını karşılama olanaklarını tehlikeye atmadan, günümüzün ihtiyaçlarını karşılamayı amaçlayan önemli bir kavramdır [27]. Sürdürülebilirlik kavramı çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları kapsayan çok yönlü bir yaklaşım olup, sürdürülebilir uygulamaları desteklemek, çevre, ekonomi ve sosyal eşitlik arasındaki dengenin korunmasına yardımcı olmaktadır [26].

Akademik literatürde, politika belgelerinde ve iş literatüründe sürdürülebilirlik üçlüsü çeşitli biçimlerde bulunmaktadır. Sürdürülebilirlik üçlüsünde sürdürülebilirliğin üç temel unsuru olan çevre, toplum ve ekonomi arasındaki bağlantıları gösteren iki model Şekil 4.1’de sunulmaktadır. Şekil 4.1 (a)’da yer alan Sürdürülebilirlik Venn Diyagramı, sürdürülebilir kalkınmanın üç temel direğini, insanlığın karşı karşıya olduğu en büyük zorlukların ve bunların birbirini nasıl etkilediğinin daha net anlaşılmasını sağlamaktadır [84]. Diagramda çevre ve toplumun kesiştiği noktada koşullar "katlanılabilir" ve "sürdürülebilir"dir. Toplum ve ekonomi arasında koşullar "eşitlikçi" ve "sürdürülebilir"dir. Ekonomi ve çevrenin örtüştüğü yerde koşullar "uygulanabilir" ve "sürdürülebilir"dir. Üç sütunun da merkezi örtüşmesi gerçek sürdürülebilirliği temsil eder. Şekil 4.1 (b)’de yer alan Eşmerkezli Daireler, ekonomiyi toplumla çevrili en içteki daire olarak tasvir eder ve toplum da çevreyle çevrilidir. Ekonomik ihtiyaçların toplumsal ihtiyaçlar içinde yer aldığını ve toplumsal ihtiyaçların da nihayetinde çevresel ihtiyaçlar içinde yer aldığını ileri sürer. Karar alma gücü ekonomide yoğunlaşmıştır ancak etkisi dışarıya doğru yayılır ve çevre en önemli sonuçları taşır. Bu model kararların etkilerinin eşitsiz dağılımıyla ilgili etik endişeleri vurgulamaktadır [85].



Şekil 4.1 Sürdürülebilirlik üçlüsünün yeniden değerlendirilmesi [85]

Sürdürülebilirlik kavramının önemi çevresel önem, ekonomik önem ve sosyal önem olarak incelenmektedir. Çevresel açıdan sürdürülebilirlik, temiz su, hava ve yaban hayatı habitatları gibi doğal kaynakların korunması ve gelecek nesillere aktarılmasının sağlanması açısından çok önemlidir. Sera gazı emisyonlarını azaltarak ve yenilenebilir enerjiyi teşvik ederek iklim değişikliğiyle mücadele edilmekte olup, sürdürülebilir uygulamalar ile biyoçeşitlilik korunmakta, türlerin yok olması önlenmekte ve ekolojik denge korunmaktadır [86]. Sürdürülebilirlik, yenilenebilir enerji ve yeşil teknolojide yenilikçiliği teşvik etmesi, ekonomik kalkınmayı ve istihdam yaratmayı teşvik etmesi nedeniyle ekonomik açıdan önemlidir. Enerji verimliliği ve atıkların azaltılması yoluyla uzun vadeli maliyet tasarrufu sağlanmakta olup, sorumlu uygulamalar sayesinde çevresel felaketlerin yanı sıra ciddi ekonomik sonuçların önlenmesine de katkı sağlamaktadır [87]. Diğer yandan sürdürülebilirlik, yiyecek, su ve barınak gibi temel kaynaklara erişimi sağladığı, sosyal eşitliği ve refahı desteklediği için sosyal açıdan önemlidir. Adil çalışma uygulamaları, sağlık hizmetleri ve eğitim de dahil olmak üzere insan haklarına öncelik vererek toplumsal istikrara katkıda bulunmakta olan sürdürülebilirlik girişimleri, ayrıcalıklı olmayan topluluklara uygun konut, eğitim ve kaynaklar sağlayarak topluluk gelişimini teşvik etmektedir [29].

Özetle sürdürülebilirlik, çevresel, ekonomik ve sosyal sistemlerin birbirine bağlılığını tanıyan bütünsel bir yaklaşım olmak üzere Dünya'nın kaynaklarının korunmasına, sorumlu ekonomik büyümenin teşvik edilmesine ve gelecek nesiller için sosyal eşitlik ve refahın sağlanmasına katkı sağlamaktadır.

4.1.1 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri

Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, Binyıl Kalkınma Hedefleri (MDG'ler) üzerine inşa edilmektedir ve Binyıl Kalkınma Hedefleri'nin başaramadığı şeyleri daha geniş ve kapsamlı bir gündemle tamamlamayı amaçlamaktadır [88].

Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, 2030 yılına kadar yoksulluğu sona erdirmek, gezegeni korumak ve herkes için barış ve refahı sağlamak amacıyla 2015 yılında Birleşmiş Milletler tarafından kabul edilen evrensel bir eylem çağrısıdır. Şekil 4.2'de verildiği üzere, 17 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefinde ve bunların 169 alt hedeflerinde çok çeşitli konular ele alınmaktadır. Hedeflerdeki bir çok konu yoksulluk, eşitsizlik, iklim değişikliği, çevresel bozulma, barış ve adalet gibi birbirine bağlı küresel zorluklardır [30].



Şekil 4.2 Sürdürülebilir kalkınma hedefleri [89]

17 ana Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri;

1. Yoksulluğun her türüne son verilmesi
2. Açlığa son verilmesi, daha iyi beslenme sağlanması ve sürdürülebilir tarımı teşvik etme
3. Sağlık ve esenlik
4. Kaliteli eğitim
5. Cinsiyet eşitliği
6. Temiz su ve sanitasyon ve suyun sürdürülebilir yönetimi

7. Uygun fiyatlı, sürdürülebilir enerji
8. Kapsayıcı ve sürdürülebilir ekonomik büyüme ve insana yakışır iş
9. Sürdürülebilir sanayileşme, inovasyon ve altyapı
10. Ülke içi ve ülkeler arası eşitsizliğin azaltılması
11. Güvenli, dayanıklı ve sürdürülebilir şehirler ve yerleşimler
12. Sorumlu tüketim ve üretim
13. İklim değişikliğiyle mücadele için eylem
14. Okyanusların ve denizlerin sürdürülebilir kullanımı
15. Ekosistemlerin ve ormanların sürdürülebilir kullanımı ve biyolojik çeşitlilik kaybının durdurulması
16. Barış, adalet ve güçlü kurumlar
17. Hedefler için ortaklıklardır [30].

Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, evrensellikleri, tüm ülkelere uygulanmaları ve sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarının birbirine bağlılığını tanıyan entegre yaklaşımları bakımından benzersizdir [90]. Bu hedefler, sürdürülebilir kalkınma için kaynakları harekete geçirmek ve bilgiyi paylaşmak amacıyla hükümetleri, sivil toplumu, özel sektörü ve akademiye kapsayan çok paydaşlı ortaklıkların önemini vurgulamaktadır [91].

Özet olarak Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, küresel zorlukların üstesinden gelmek için kapsamlı ve entegre bir çerçeve sağlayarak, kalkınma düşüncesinde bir paradigma değişikliğini ve herkes için daha sürdürülebilir, eşitlikçi ve refah bir dünya yaratmaya yönelik bir yol haritasını temsil etmektedir.

4.1.2 Tekstil Endüstrisinde Sürdürülebilirlik Uygulamaları

Tekstil endüstrisi, hazır giyim üretimi için çeşitli süreçleri ve birden fazla ortağı içeren oldukça karmaşık ve kapsamlı bir tedarik zincirine sahiptir. Tekstil tedarik zincirindeki kilit prosesler ve oyuncular arasında hammaddeler, enerji, su, kimyasallar, yardımcı maddeler ve işgücü girdileri yer alır ve bunların sonucunda nihai ürünler, emisyonlar, atıksu ve katı atık gibi çıktılar oluşmaktadır [7].

Tekstil sektöründe karbon ayak izinin azaltılarak sürdürülebilir kalkınma hedeflerine uyum doğrultusunda gerçekleştirilmesi gereken pek çok adım bulunmakta olup bunlardan bazıları Şekil 4.3'te yer almaktadır.

Sürdürülebilirlik uygulamaları tekstil endüstrisindeki su ve enerji tüketiminin azaltılması, atık ve kirliliğin en aza indirilmesi yoluyla çevresel etkilerin azaltılmasını sağlarken, adil çalışma koşullarını teşvik ederek sosyal olarak daha sorumlu bir topluma katkıda bulunabilmektedir [92].

Tekstil endüstrisinde çevresel etkiyi azaltmak ve çevre dostu üretimi teşvik etmek için çeşitli temel sürdürülebilirlik uygulamaları hayata geçirilmektedir. Önemli uygulamalardan biri sürdürülebilir malzemelerin kullanılmasıdır. Bu, pestisit, herbisit veya sentetik gübre kullanılmadan yetiştirilen organik pamuğun kullanılmasını, böylece zararlı kimyasal kullanımının azaltılmasını ve toprak sağlığının desteklenmesini içerir [93]. Ek olarak, geri dönüştürülmüş pamuk, polyester ve naylon gibi geri dönüştürülmüş elyafların dahil edilmesi atıkların azaltılmasına ve işlenmemiş malzemelere olan talebin azaltılmasına yardımcı olur [94]. Ayrıca, odun hamurundan yapılan Tencel ve ananas yapraklarından elde edilen Piñatex gibi geleneksel sentetik elyaflara sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesi, tekstil ürünlerinin kalitesini ve işlevselliğini korurken çevresel etkiyi en aza indiren yenilikçi çözümler sunmaktadır [95].

Sürdürülebilir malzemelere yönelik sertifikalar, tekstil endüstrisinde çevre dostu ve etik uygulamaları garanti eder. Global Organik Tekstil Standardı (Global Organic Textile Standard: GOTS), zararlı kimyasallar kullanılmadan üretilen organik tekstilleri sertifikalandırır [96]. OEKO-TEX sertifikası, tekstil ürünlerini zararlı maddeler açısından test ederek güvenlik ve çevrenin korunmasını sağlar [94]. Sorumlu Yün Standardı (Responsible Wool Standard: RWS), hayvan refahını ve sürdürülebilir arazi yönetimini teşvik eden etik yün üretimini onaylar [97]. Bu sertifikalar tekstil endüstrisinde şeffaflık sağlamaktadır ve sürdürülebilir uygulamaları teşvik etmektedir.

Tekstil endüstrisinde çevresel etkiyi azaltmak için su ve enerji verimliliği kritik öneme sahiptir. Kapalı devre üretim sistemlerinin uygulanması, su kullanımını en aza indirerek atıksuyu arıtarak sürdürülebilirliği sağlamaktadır [98]. Gelişmiş boyama ve terbiye teknolojileri daha az su ve kimyasal kullanarak kaynak tüketimini optimize ederken ıslaktan kuruya tekniklerin benimsenmesi su kullanımını daha da azaltmaktadır [99].

Ek olarak, enerji tasarruflu makinelerin ve güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, sektörün karbon ayak izini önemli ölçüde azaltarak daha sürdürülebilir bir üretim sürecini teşvik etmektedir [100].



Şekil 4.3 Tekstil sektöründe karbon ayak izinin azaltılma yolları [101]

Tekstil endüstrisinde, adil ücret, güvenli çalışma koşulları ve işçi refahını vurgulayan etik işgücü uygulamaları çok önemlidir [97]. Adil ticaret ilkeleri korunmakta ve zorla çalıştırma ve çocuk işçiliğinin ortadan kaldırılmasına yönelik tedbirlere öncelik verilmektedir. Tedarik zincirlerinde şeffaflık, üretim boyunca etik standartları teşvik ederek hesap verebilirliği sağlar [102].

Döngüsel moda ve atıkların azaltılması tekstil endüstrisinde çok önemli hale gelmektedir. Şirketler çevresel etkiyi en aza indirmek için tekstil atıklarının yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve ileri dönüşümü gibi stratejilere odaklanmaktadır [103]. Onarılabilen veya yeniden kullanılabilen, dayanıklı, yüksek kaliteli ürünler tasarlamak, giysilerin ömrünü uzatarak yeni üretim ihtiyacını azaltmaktadır. Doğrusal bir "al-yap-at" modelinden döngüsel sistemlere geçiş, malzemeleri ve ürünleri mümkün olduğu kadar uzun süre kullanımda tutarak sürdürülebilirliği teşvik eder, böylece israfı azaltarak kaynakların korumasını sağlar [104].

4.2 Döngüsel Ekonomi Kavramı ve Önemi

Şekil 4.4'te gösterildiği gibi döngüsel ekonomi, yeniden kullanım, onarım, yenileme ve geri dönüşüm döngülerini sürdürerek israfı ortadan kaldırmak ve kaynak kullanımını optimize etmek için tasarlanmış sürdürülebilir ve yenileyici bir ekonomik paradigmayı temsil etmektedir [105]. Bu ideoloji, geleneksel doğrusal "al-yap-at" modelinin karşısı olup bunun yerine, malzemelerin ve ürünlerin uzun süreler boyunca dolaşımda tutulduğu, dolayısıyla israfın en aza indirildiği ve kaynak verimliliğinin en üst düzeye çıkarıldığı kapalı döngü sistemini savunmaktadır [106].



Şekil 4.4 Döngüsel ekonomi yaklaşımı [107]

4.2.1 Döngüsel Ekonomi ve Temel Prensipleri

Döngüsel ekonomi üç temel prensip üzerine inşa edilmiştir. İlk olarak, ürün ve malzemeleri her türlü atık veya kirliliği önleyecek şekilde tasarlayıp üreterek atık ve kirliliği ortadan kaldırmayı, böylece bunların katı atık depo sahalarında birikmesini veya çevreye salınmasını önlemeyi amaçlamaktadır [108]. İkinci olarak, yeniden kullanım, onarım, yeniden üretim ve geri dönüşüm gibi uygulamalarla elde edilen ürün ve malzemelerin mümkün olduğu kadar uzun süre en yüksek değerinde dolaşımını vurgulamaktadır [109]. Son olarak, toprağa ve diğer ekosistemlere değerli besin maddeleri vererek doğal sistemleri yenilemeye, böylece çevresel sürdürülebilirliği ve ekolojik dengeyi desteklemeye çalışmaktadır [110].

Döngüsel ekonomi çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarda çok sayıda fayda sunmaktadır. İlk olarak döngüsel ekonomi ilkelerinin benimsenmesi, kayda değer çevresel faydalar sağlamaktadır. Kaynak kullanımını optimize ederek ve atık oluşumunu en aza indirerek kaynakların korunmasını kolaylaştırır, böylece sınırlı doğal kaynakların çıkarılması ihtiyacını azaltır ve çıkarma faaliyetleriyle ilişkili çevresel etkileri hafifletir [111]. Bunun yanı sıra yeniden kullanım, onarım ve geri dönüşüm gibi döngüsel uygulamalar, yeni malzeme ve ürünlerin imalatına olan talebin azalmasına bağlı olarak sera gazı emisyonlarında önemli bir azalmaya katkıda bulunmaktadır.

Ayrıca döngüsel ekonomi, üretim süreçlerinden atık ve toksik maddeleri büyük ölçüde ortadan kaldırarak hava, su ve toprak kirliliğinin azaltılmasına yardımcı olur. Böylece döngüsel ekonomi yaklaşımı, ekosistemleri ve insan sağlığını kirliliğin olumsuz etkilerinden korumaktadır [112].

Döngüsel ekonomi ilkelerinin benimsenmesinde diğer bir etken ekonomik faydaların sağlanmasıdır. Döngüsel iş modelleri kaynak verimliliğini teşvik ederek malzeme girdileri, atık yönetimi ve enerji tüketimiyle ilgili maliyetleri azaltır. Bu artan verimlilik, üretim süreci boyunca maliyet tasarrufuna yol açmaktadır [113]. Diğer etken ise döngüsel ekonomi ürün tasarımında, malzeme seçiminde ve iş modellerinde yeniliği teşvik ederek rekabet gücünü artırır ve işletmeler için yeni pazar fırsatları açar. Gelişmekte olan bu sektörler iş yaratma fırsatları sunmakta ve genel ekonomik kalkınmaya ve refaha katkıda bulunmaktadır [112].

Döngüsel ekonomi ilkelerinin benimsenmesi ayrıca, sosyal faydalar da sağlamaktadır. İthal hammaddelere bağımlılığı azaltarak ve yerel kaynakları maksimuma çıkararak uluslar daha fazla kendi kendine yeterlilik ve dayanıklılık elde edebilirler [110]. Ayrıca döngüsel uygulamaların uygulanması havanın, suyun ve toprağın daha temiz olmasını sağlayarak halk sağlığını ve genel yaşam kalitesini artırmaktadır [114]. Üstelik döngüsel ekonomi, erişime dayalı modeller gibi sürdürülebilir tüketim kalıplarını teşvik ederek ve dayanıklı, onarılabılır ürünlere öncelik vererek daha sorumlu tüketici davranışını teşvik etmektedir ve uzun vadeli toplumsal refaha katkıda bulunmaktadır [115].

4.2.2 Tekstil Endüstrisinde Döngüsel Ekonomi Yaklaşımları

Tekstil endüstrisindeki döngüsel ekonomi yaklaşımları, tekstil ürünlerinin tüm yaşam döngüsü boyunca israfın azaltılmasına, kaynak verimliliğinin maksimuma çıkarılmasına ve çevresel etkinin en aza indirilmesine odaklanmaktadır. Bu konudaki bazı temel yaklaşımlar şu şekildedir;

Tekstil atıklarının geri dönüşümü: Yeni ürünler veya malzemeler oluşturmak için tekstil atıklarının geri dönüştürülmesini ve ileri dönüştürülmesini döngüsel ekonomi ile teşvik etmektedir. Bu yaklaşım, eski tekstilleri yeni elyaflara dönüştürmek için yeni ipliğe dönüştürülebilecek elyaflara parçalanarak mekanik geri dönüşüm süreçlerini veya tekstilleri yeniden kullanım için orijinal bileşenlerine ayırmak için kimyasal geri dönüşüm yöntemlerini içerebilir [31].

Döngüsellik için tasarım: Dayanıklı malzemeler kullanarak ve zararlı kimyasalların kullanımını en aza indirerek, uzun ömürlülük ve geri dönüştürülebilirlik göz önünde bulundurularak tekstil ve giysilerin tasarlanması döngüsel tasarım için ilk hedeftir [32]. Bu süreç ürünün ham madde çıkarılmasından, kullanım ömrü sonu imhasına veya geri dönüştürülmesine kadar tüm yaşam döngüsünü kapsamakta olup geri dönüştürülmüş polyester veya pamuk gibi geri dönüştürülmüş elyafların yeni tekstil ürünlerine dahil edilmesi ve ürün ömrünü uzatmak için ürün tasarımında dayanıklılık, tamir edilebilirlik ve modülerliğe odaklanması ile gerçekleştirilmektedir [2].

Kapalı döngü üretim sistemleri: Malzemelerin sürekli olarak geri dönüştürüldüğü ve üretim sürecinde yeniden kullanıldığı kapalı döngü sistemlerinin uygulanması, işlenmemiş kaynaklara olan ihtiyacın azaltılması ve atık oluşumunun en aza indirilmesini teşvik etmektedir [33].

Genişletilmiş üretici sorumluluğu (Extended Producer Responsibility: EPR): Üreticileri, toplama, geri dönüşüm ve imha dahil olmak üzere ürünlerinin tüm yaşam döngüsünün sorumluluğunu üstlenmeye ikna eden EPR programları, kullanılmış giysilerin yeniden satış veya geri dönüşüm için geri kazanılmasına yönelik markaların geri alma ve yenileme programları olup üreticileri kolaylıkla geri dönüştürülebilecek tekstil ürünleri tasarlamaya teşvik etmektedir [116].

İşbirlikçi girişimler: Tekstil endüstrisinde döngüsellığe yönelik yenilikçi çözümler geliştirmek için üreticiler, perakendeciler, tüketiciler ve atık yönetimi şirketleri dahil olmak üzere tedarik zincirindeki paydaşlarla işbirliği yapmak oldukça önemlidir. Bu yaklaşım, tekstil atıklarının toplanması ve geri dönüştürülmesine yönelik ortaklıkların yanı sıra tüketicileri sürdürülebilir tüketim uygulamaları konusunda eğitmeye yönelik girişimleri de içermektedir [117].

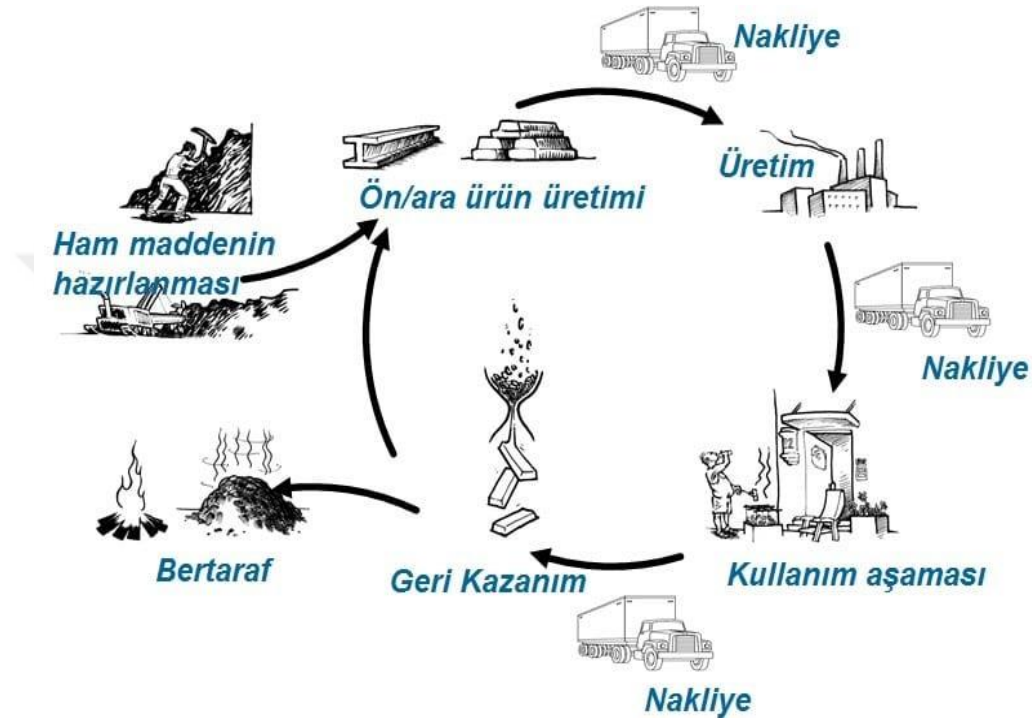
Özet olarak döngüsellığe geçiş kavramı, tasarımcılardan üreticilere, markalara, geri dönüşümcülere ve politika yapıcılara kadar tekstil değeri zinciri genelinde işbirliğini gerektirmekte olup inovasyon, paydaş katılımı ve destekleyici politikalar yoluyla teknik, ekonomik ve sistemik engellerin aşılması, döngüsellığın yaygınlaştırılmasının anahtarıdır [2].

5.1 Yaşam Döngüsü Analizi Kavramı ve Tanımı

Yaşam Döngüsü Analizi (YDA), bir ürün, süreç veya hizmetin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendiren bir metodolojidir [34]. YDA kavramı, ilk olarak 1960'larda çevre sorunlarına ve kaynakların tükenmesine ilişkin farkındalığın artmasıyla ortaya çıkmıştır. 1970'lerde YDA, çeşitli endüstrilerdeki enerji tüketimini ve atık oluşumunu analiz etmek için kullanılırken Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği (Society of Environmental Toxicology and Chemistry: SETAC), 1990'larda YDA metodolojisinin standartlaştırılmasında önemli bir rol oynamıştır. Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization: ISO), 1997 yılında YDA'lerinin yürütülmesi için kapsamlı yönergeler sağlayan ISO 14040 serisini yayınlayarak bu çerçeveyi daha da sağlamlaştırmıştır [118].

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, bir ürünün, sürecin veya hizmetin, hammadde çıkarılmasından kullanım ömrü sonu imhasına veya geri dönüşümüne kadar tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini ölçen kapsamlı bir yöntemdir [35]. Beşikten mezara yaklaşımı, bir ürünün hammadde çıkarılmasından nihai imhasına kadar çevresel etkisini değerlendirir ve her aşamada olumsuz etkileri en aza indirmeye odaklanır [36]. Buna karşılık, beşikten beşiğe yaklaşımı, ürünleri sürekli yeniden kullanım veya geri dönüşüme yönelik tasarlayarak, malzemelerin başka amaçlara uygun kullanılmasını sağlayarak ve tamamen imha edilmesini önleyerek dögüsel bir ekonomiyi vurgulamaktadır. Bu yöntem, atıkları en aza indiren ve ürünlerin yaşam döngüsünü uzatan sürdürülebilir, yenileyici sistemler oluşturmayı amaçlamaktadır [37]. Şekil 5.1'den görüleceği üzere, yaşam döngüsünün analizinde hammaddenin temini, üretim, nakliye, kullanım ve kullanım ömrü sonu işlemleri gibi tüm aşamalar tek tek ele alınmaktadır [119].

YDA, enerji tüketimi, su kullanımı, sera gazı emisyonları ve atık üretimi gibi her aşamayla ilişkili potansiyel çevresel etkileri tanımlamayı ve değerlendirmeyi amaçlamakta olup, bu yaklaşım, bir ürünün çevresel ayak izine bütünsel bir bakış sunarak iyileştirme alanlarının belirlenmesine yardımcı olur ve daha sürdürülebilir uygulama ve ürünlerin geliştirilmesini destekler [34].

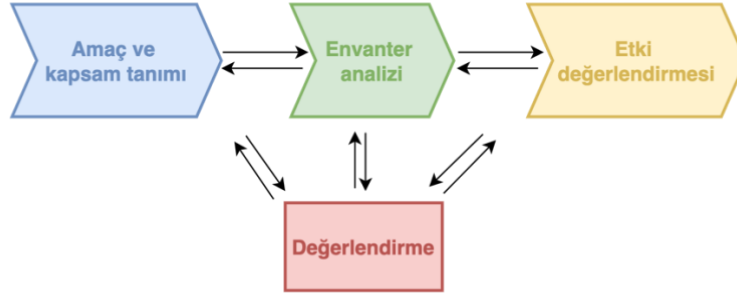


Şekil 5.1 Yaşam döngüsü analizi akım şeması [120]

Yaşam Döngüsü Analizi, şirketlerin çevresel ayak izlerini belirleme ve azaltma yeteneği de dahil olmak üzere çok sayıda avantaj sunmaktadır ve bu değerlendirme, maliyet tasarrufu ve gelişmiş sürdürülebilirlik performansı sağlamaktadır [38]. YDA, çeşitli malzemelerin, süreçlerin ve tasarım seçimlerinin çevresel etkilerine ilişkin bilgiler sağlayarak ürün geliştirmeye yardımcı olurken çevresel performansa dayalı olarak alternatif ürün, süreç veya hizmetlerin karşılaştırılmasını ve değerlendirilmesini kolaylaştırır, çevresel düzenlemelere uygunluğa yardımcı olur ve çevresel iddiaları ve eko-etiketlemeyi destekler [35]. Bunlara ek olarak YDA, çevresel raporlama ve karar alma süreçlerinde şeffaflığı ve güvenilirliği teşvik etmektedir [119].

5.2 Yaşam Döngüsü Analizi'nin Temel Adımları

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi YDA'nın amaç ve kapsam (1), envanter analizi (2), etki değerlendirmesi (3) ve değerlendirme (4) olmak üzere dört aşaması bulunmaktadır.



Şekil 5.2 Yaşam döngüsü analizi metodolojisi [121]

Amaç ve Kapsam: Bu ilk adımda Şekil 5.3'te görüldüğü gibi YDA çalışmasının amacını, amaçlanan uygulamaları, girdileri, sistem sınırları ve çıktıları belirlenir. YDA'nın yürütülmesinin nedenlerinin açıkça belirtilmesini, incelenen ürün/süreç sisteminin tanımlanmasını ve analize nelerin dahil edileceğinin veya analizin dışında tutulacağını belirlenmesini yani sistem sınırlarını içermektedir [39].

Envanter Analizi: Bu adım, yaşam döngüsü aşamaları boyunca ürün/süreç sistemiyle ilişkili verilerin toplanmasını ve ilgili girdilerin (örneğin ham maddeler, enerji) ve çıktıların (örneğin emisyonlar, atıklar) ölçülmesini içerir. Yaşam Döngüsü Envanteri (YDE) olarak da bilinen bu adımda, tanımlanan sistem sınırları dahilinde her aşama için doğaya giden ve doğadan gelen tüm çevresel akışların bir envanteri oluşturulmaktadır [122].

Etki Değerlendirmesi: Bu adımda, YDE'de ölçülen girdi ve çıktılarla ilişkili potansiyel çevresel etkiler değerlendirilir ve karakterize edilir. Etki değerlendirme, çalışılan sistemin potansiyel çevresel etkilerinin büyüklüğünü ve önemini anlamayı ve değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Etki kategorileri seçildikten sonra envanterdeki emisyon, enerji ve malzeme akışına dayalı olarak bunlar üzerindeki etkiler değerlendirilmektedir [119].

Değerlendirme: Son adım olarak çalışmanın başında belirtilen amaç ve kapsam bağlamında sonuçlar analiz edilmektedir. İyileştirme değerlendirmesi, sonuç çıkarmak, önerilerde bulunmak, iyileştirilecek alanları belirlemek ve karar almayı desteklemek için önceki aşamalardan elde edilen bulguları birleştirmekte olup, sonuçların analiz edilmesini, sağlamlıklarının ve eksiksizliklerinin değerlendirilmesini ve bulguların çalışmanın belirtilen hedefleriyle ilişkilendirilmesini içermektedir [34].



Şekil 5.3 Yaşam döngüsü girdileri, sistem sınırları ve çıktıları

5.3 Yaşam Döngüsü Analizi'nin Tekstil Endüstrisindeki Yeri

YDA, ürünün yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerin belirlenmesine ve azaltılmasına yardımcı olması, sürdürülebilir uygulamaları desteklemesi, kaynak verimliliğini artırması ve çevresel düzenlemelere uyuma yardımcı olması nedeniyle tekstil endüstrisinde oldukça önemlidir. YDA'nın tekstil endüstrisinde birkaç önemli uygulaması vardır. Bunlar; Ürün Geliştirme ve İyileştirme (1), Alternatif Ürün veya Süreçlerin Karşılaştırılması (2), Çevresel Etiketleme ve Sertifikasyon (3), Geri Dönüşüm ve Döngüsel Ekonomi Stratejilerinin Değerlendirilmesi (4), Stratejik Planlama ve Politika Geliştirme (5) olarak sıralanabilir.

Ürün geliştirme ve iyileştirme, YDA, tekstil ürünlerinin ham madde temini aşamasından imhasına veya geri dönüşümüne kadar yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanılmakta olup, bu adım önemli çevresel etkenlere sahip aşamaların belirlenmesine yardımcı olarak ürün tasarımcılarına ve üreticilere olanak sağlamaktadır [123].

Bu doğrultuda YDA ile süreçleri optimize etmek, kaynak tüketimini azaltmak ve israfı en aza indirmek mümkün olmaktadır ve böylece daha verimli ve sürdürülebilir üretim sağlanmaktadır [124].

Alternatif ürün veya süreçlerin karşılaştırılması, YDA, farklı tekstil ürünlerinin, malzemelerinin veya üretim süreçlerinin çevresel performansının kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır ve geleneksel pamuk ve organik pamuk gibi alternatifler veya farklı boyama teknikleri arasında seçim yaparken çevresel etkilerini değerlendirerek karar vermeyi desteklemektedir [125].

Ayrıca YDA, çevre dostu malzeme ve süreçlerin seçimini değerlendirerek daha yeşil tekstil ürünlerine teşvik etmektedir [126]. Çevresel etiketleme ve sertifikasyon ise, tekstil endüstrisindeki AB Ecolabel veya Nordic Swan etiketi gibi çevresel etiketleme ve sertifikasyon programları için YDA'yı temel olarak kullanmaktadır. Bu etiketler, sıkı YDA çalışmalarına dayanarak tüketicilere bir ürünün çevresel ayak izi hakkında güvenilir bilgi sağlamaktadır [127].

Geri dönüşüm ve döngüsel ekonomi stratejilerinin Değerlendirilmesi, tekstil endüstrisinde geri dönüşüm, yeniden kullanım veya diğer döngüsel ekonomi stratejilerinin çevresel etkilerini ve faydalarını değerlendirmek için YDA'nın değerli bir araç olduğunu göstermektedir. Daha sürdürülebilir ve döngüsel iş modellerine geçişi destekleyerek kaynak tüketimi, enerji kullanımı ve emisyonlar açısından potansiyel tasarrufları ölçmeyi sağlamaktadır [128].

Stratejik planlama ve politika geliştirme kapsamında, YDA çalışmaları, tekstil endüstrisi için bireysel şirketlerden endüstri birliklerine veya hükümetlere kadar çeşitli düzeylerde stratejik planlama ve politika geliştirme konusunda bilgi sağlayabilir. Örneğin YDA, uygun politikalar veya teşvikler yoluyla döngüsel ekonomi uygulamalarının desteklenmesine yönelik fırsatların belirlenmesine yardımcı olmaktadır [129].

Genel olarak YDA çalışmaları sayesinde tekstil endüstrisinde daha sürdürülebilir üretim uygulamalarına, azaltılmış çevresel etkilere ve daha yüksek verimliliğe yol açan bilinçli kararlar alınabilmektedir.

5.4 Yaşam Döngüsü Analizi'nin Sürdürülebilirlik

Değerlendirmelerindeki Yeri

YDA, ürünlerin, süreçlerin ve hizmetlerin tüm yaşam döngüleri boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanılan, yaygın olarak tanınan ve standartlaştırılmış bir metodolojidir [35]. Sürdürülebilirliğin üçlü sorumluluk modelini oluşturan üç sütundan (çevresel, ekonomik ve sosyal) biri olan sürdürülebilirliğin çevresel sütununun değerlendirilmesine yönelik kapsamlı ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır [130].

YDA, çevresel YDA'yı ekonomik etkiler için Yaşam Döngüsü Maliyetleme (Life Cycle Cost: LCC) ve sosyal etkiler için Sosyal Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Social Life Cycle Assessment: SLCA) gibi ek değerlendirme araçlarıyla bütünleştiren Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (Life Cycle Sustainability Assessment: LCSA) olarak bilinen daha geniş bir çerçeveye dönüşmüştür. Bu bütünsel ve disiplinler arası yaklaşım, YDA'nın çevresel boyutun değerlendirilmesinde temel metodoloji olarak hizmet vermesiyle sürdürülebilirliğin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır [131]. Bu entegrasyon, çevresel etkileri ve iyileştirme fırsatlarını belirleyerek bilinçli karar almayı, sürdürülebilir ürün tasarımı, süreç optimizasyonunu ve politika geliştirmeyi desteklemektedir [132].

YDA sonuçlarının uygulanması, çevresel etiketleme ve sertifikasyon programları, eko-tasarım düzenlemeleri ve sürdürülebilirlik raporlaması dahil olmak üzere sürdürülebilirlikle ilgili çeşitli bağlamları kapsamaktadır [133]. Her ne kadar geleneksel olarak çevresel etkilere odaklanmış olsa da, YDA'nın LCSA çerçevesinde LCC ve SLCA ile entegrasyonu, çevresel, ekonomik ve sosyal yönler arasındaki karşılıklı ilişkiler ve değiş-tokuşlar dikkate alınarak sürdürülebilirliğin daha bütünsel bir değerlendirmesini kolaylaştırmaktadır. Bu kapsamlı yaklaşım, çevresel düzenlemelere ve standartlara uyumu sağlayarak birçok sektörde sürdürülebilir uygulamaları teşvik etmektedir [130].

Özetle YDA, sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde temel bir bileşen olup ürünlerin, süreçlerin veya hizmetlerin yaşam döngüleri boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek için sağlam ve standartlaştırılmış bir metodoloji sağlamaktadır.

Prosesin ilk aşaması olan yükleme adımında, endüstriyel çamaşır makineleri genellikle ceket veya kot pantolon olmak üzere denim giysilerle doldurulur. Bu makineler büyük, delikli tamburlar içerir ve özellikle taş yıkamak için üretilmiştir. Denim giysiler, yüklemeden önce herhangi bir yabancı madde veya haşıl maddesinden arındırılmak için bir ön işlem prosedüründen geçirilebilir. Yıkama adımında ise makine çalkalanarak pomza taşlarının denim kumaşa çarpması sağlanmış olur ve indigo boyanın dış tabakası bu aşındırma işlemiyle kaldırılarak denime soluk veya eskimiş bir görünüm kazandırılır. Kumaşın türü, makine ayarları ve istenilen eskitme seviyesi, yıkama işleminin süresini etkiler. Bu aşama birkaç dakikadan birkaç saate kadar sürebilir. Yükleme ve yıkama adımlarından sonra istenilen yıkama süresine ulaşıldığında denim giysi, kalan pomza taşı kalıntılarından ve ekstra renkten kurtulmak için tamamen durulanır. Kumaştaki tüm yabancı maddelerin ortadan kaldırıldığını garanti etmek için, durulama prosedürü genellikle birkaç aşamalı su durulama döngüsünü gerektirir. Bazı durumlarda, durulama işlemi sırasında bir kumaş yumuşatıcısının veya yumuşatıcı kimyasalın eklenmesi kotun tuşe hissini artıracak ve sertliğini azaltacaktır. Proses akış şemasına göre (Şekil 6.1) durulama sonrasında haşıl sökme işleminin yer aldığı görülmektedir. Denim ön işleme tabi tutulmamışsa, yıkama ve durulama sonrasında yeniden boyutlandırılabilir. Haşıl sökme, kumaş üretim sürecinde kalan haşıl maddelerini ortadan kaldırarak denimin yumuşak olmasının yanı sıra ek işlemlere de hazır olmasını sağlar. Denim üreticisinin spesifikasyonlarına bağlı olarak haşıl sökme işlemi kimyasal veya enzimatik süreçlerle gerçekleştirilebilir. Haşıl sökme işleminden sonra denime lokal solma ve eskitilmiş bir görünüm oluşturmak için kumaşın belirli bölgelerine potasyum permanganate (PP) çözeltisinin uygulanmasını içeren PP spreyleme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem denimdeki doğal aşınma desenlerini taklit eder. Denim giysinin görünüşünü ve hissini iyileştirmek için ekstra prosedürler veya işlemler gerekebilir. Bu ilave işlemler, orta süreç olarak adlandırılan aşamada denim karakterini vermek ve özel eskitme efektleri elde etmek için elle zımparalama, fırçalama, taşlama veya lazerle eskitme gibi prosedürler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Sonrasında ise denim giysinin konforunu ve tuşe hissini arttırmak, denime pürüzsüz, ipeksi bir doku kazandırmak ve kullanıcı konforunu arttırmak için istenilen eskitme etkisi elde edildikten sonra yumuşatıcılar ile muamele sağlanarak yumuşatma işlemi uygulanır.

Boşaltma adımımda ise, denim giysiler gerekli tüm işlem ve uygulamalardan geçtikten sonra çamaşır makinesinden veya üretim hattından çıkarılır. Gerekli standartları ve spesifikasyonları karşıladıklarından emin olmak için kalite kontrolün bir parçası olarak kapsamlı bir denetime tabi tutulurlar. Boşaltma sonrasında, denim giysilerdeki fazla su, bir santrifüj veya ekstraktör makinesi kullanılarak uzaklaştırılır. Denim giysiler daha sonra kurutma makinelerine aktarılır ve burada ya havayla kurutulur ya da bir çamaşır kurutma makinesi kullanılarak kurutulur. Kurutma işlemi denim giysilerin tamamen kurumasını ve son rötuşlara, paketlemeye ve dağıtımına hazır olmasını sağlar.

Denim üretiminde aynı zamanda atıksu arıtma sürecini de tesiste bulunan arıtma tesisinde gerçekleştirilmektedir. Çeşitli aşamalardan (durulama, haşıl sökme, orta süre, yumuşatma) gelen atıksu önce kum tutucu filtreden, ardından da tambur filtreden geçirilmekte olup filtrelenen su kimyasal arıtmaya tabi tutulur ve ardından MBBR yöntemi kullanılarak biyolojik arıtma yapılır. Biyolojik arıtma sonrası su, tekrar kimyasal arıtma uygulanarak ultrafiltrasyona ve ters ozmoz işlemine tabi tutulur. Kum tutucu, filtre tamburu, kimyasal arıtma, MBBR, ultrafiltrasyon ve ters ozmoz işlemlerinden sonra ortaya çıkan çamur, filtre preste işlenerek kimyasal arıtma işleminin öncesine tekrardan gönderilerek tekrar arıtmaya tabi tutulmaktadır. Son olarak arıtılan su, nehre deşarj edilmeden önce endüstriyel atıksu arıtma tesisine yönlendirilmektedir. Firmadan elde edilen verilere göre, atıksuyun arıtılması için günlük olarak 2952.74 kW elektrik tüketildiği ve en yüksek tüketimin 24 saat boyunca çalışan kompresörlerden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ayrıca arıtma sürecinde günlük olarak 123,94 kg kimyasal kullanılırken 420 ton su kullanıldığı belirlenmiştir. Pomza taşı kullanımından kaynaklanan atıksu ve üretilen atık çamura ait (tesis içerisinde belirlenen geçici depolama alanında depolanmaktadır) pH, iletkenlik, çözülmüş oksijen, kimyasal oksijen ihtiyacı, askıda katı madde gibi parametrelerinin kapsamlı analizleri, Atıkların Düzenli Depolanması Hakkında Yönetmelik ve Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nin öngördüğü değerlere uygun olarak yapılmıştır. Analiz sonuçları detaylı olarak incelendiğinde, değerlendirilen etki parametrelerinin mevzuatın izin verdiği sınır değerler içerisinde kaldığı gözlemlenmiştir.

6.2 Çalışmaya Ait Verilerin Toplanması

Araştırılan denim yıkama ve hazırlama fabrikasında sistem sınırları içerisindeki prosesler için aşağıdaki bilgiler firmadan temin edilmiştir:

- Su Tüketim Miktarı
- Elektrik Tüketimi
- Oluşan Atıksu Miktarı
- Atıksu Analiz Sonuçları
- Atıksu Çamuru Analiz Sonuçları

Elde edilen bu veriler, tesisin operasyonlarıyla ilgili kaynak kullanımı ve çevresel etkiye ilişkin kapsamlı bir genel bakış sağlamaktadır. Su tüketim miktarı, yıkama ve hazırlama süreçlerinde ne kadar su kullanıldığını ortaya koyarken, elektrik tüketim verisi kullanılan prosesin enerji ihtiyacını ve kaynaklarını göstermektedir. Üretilen atıksu miktarı, arıtılması ve yönetilmesi gereken su hacmi hakkında fikir verirken, detaylı atıksu analiz sonuçları, atıksudaki kirleticilerin anlaşılmasına yardımcı olur; bu da çevre düzenlemelerine uyum ve atıksu arıtma süreçlerinin planlanması açısından çok önemlidir. Benzer şekilde atıksu çamuru analiz sonuçları, uygun bertaraf veya geri dönüşüm yöntemlerinin belirlenmesi için gerekli olan çamurun bileşimi ve özellikleri hakkında bilgi sağlar. Sağlanan bu veriler çevresel ayak izinin ve kaynak verimliliğinin kapsamlı bir çerçevesini oluşturmaktadır. Pomza taşı ile yıkama işlemi sırasında her bir makina için (4 adet pantolon yüklenmektedir) 70 L su tüketildiği verisi firma tarafından temin edilmiştir. Ayrıca 55 dakikalık her bir yıkama için 8,8 kWh enerji tüketildiği verisine ulaşılmış olup, bu veriler kapsamında ayrıntılı hesaplamalar Bölüm 7.2'de analiz edilmiştir.

6.3 Yaşam Döngüsü Analizi için Kullanılan Programlar

Yaşam Döngüsü Analizi için dünya çapında birçok program ve veri tabanı vardır. Bu programlardan en yaygın kullanılanları SimaPro, GaBi, OpenLCA, Umberto ve Ecochain olarak sıralanabilir.

SimaPro programı yaygın olarak kullanılan ve kapsamlı kapasitesi ve kullanıcı dostu arayüzü ile tanınan bir YDA programıdır ve PRé Sustainability tarafından oluşturulmuştur.

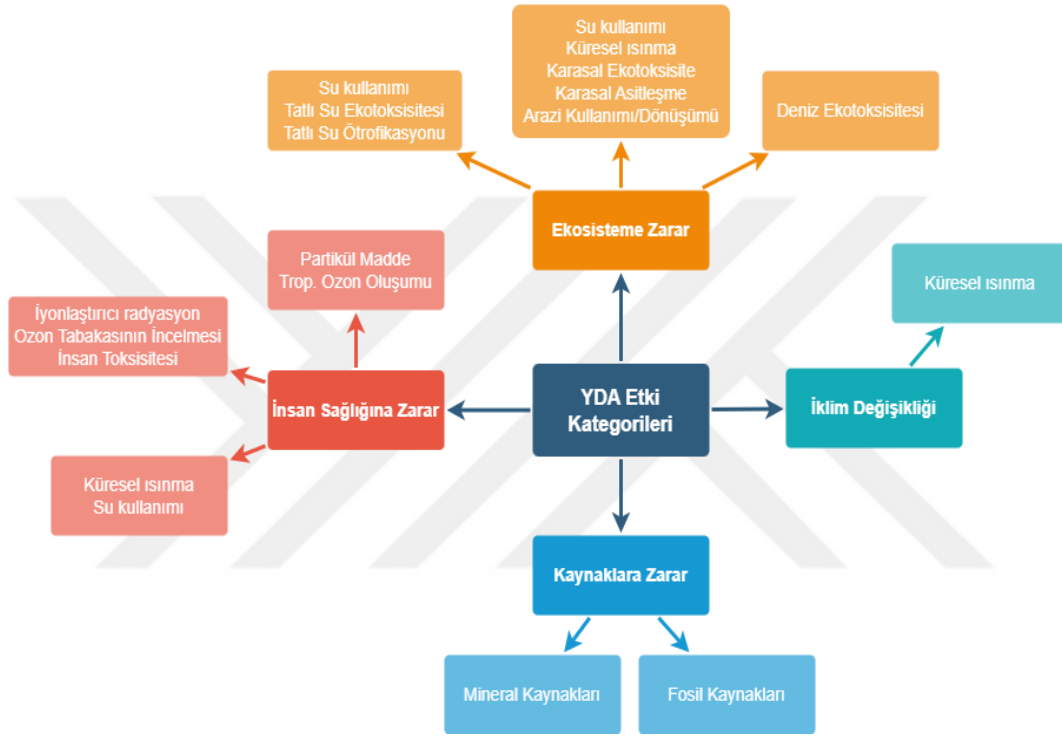
Senaryo analizi ve hassasiyet değerlendirmeleri gibi gelişmiş yeteneklere olanak tanıyan SimaPro, geniş bir yaşam döngüsü envanter verisi kitaplığı sağlar. Bu nedenle SimaPro küresel endüstride, araştırmada ve eğitimde yaygın olarak kullanılmaktadır [134]. ReCiPe modeli, SimaPro yazılım programıyla birlikte yaygın olarak yaşam döngüsü etki değerlendirmesi için kullanılan bir puanlama yöntemidir. ReCiPe yönteminin temel amacı, uzun yaşam döngüsü envanter sonuçları listesini sınırlı sayıda gösterge puanına dönüştürmektir [135]. Bu gösterge puanları, bir çevresel etki kategorisindeki göreceli şiddeti ifade etmektedir. ReCiPe'de yer alan göstergeler 18 orta nokta ve 4 uç nokta göstergesi olmak üzere iki düzeyde belirlenmekte olup [136] modelin genel yapısı Şekil 6.2'de yer almaktadır.

Thinkstep AG tarafından oluşturulan GaBi, sürdürülebilirlik değerlendirmelerine yönelik çok çeşitli özelliklere sahip, iyi bilinen bir YDA programıdır [40]. GaBi sıklıkla elektronik, otomotiv ve imalat sektörlerinde çevresel sonuçları değerlendirmek için kullanılmakta olup, yazılıma ait detaylı bilgi Bölüm 6.4'te işlenecektir.

Bir diğer yaygın kullanılan program ise GreenDelta GmbH tarafından geliştirilen OpenLCA programıdır ve yaşam döngüsü değerlendirmeleri için ücretsiz bir platform sunarak açık kaynaklı bir yaşam döngüsü değerlendirme programıdır [137]. Veri girişi, yaşam döngülerinin modellenmesi ve etki değerlendirmelerinin çeşitli şekillerde yürütülmesi için araçlar sağlar. Sürdürülebilir kalkınmaya ilgi duyan araştırmacılar, uygulayıcılar ve kuruluşlar OpenLCA'yı oldukça popüler bulmaktadır [138].

Umberto yazılım programı ise IFU Hamburg GmbH, tarafından geliştirilen Yaşam Döngüsü Değerlendirmesini içeren, malzeme akışı ve çevre çalışmaları için her şey dahil yazılım paketidir [139]. Program, dinamik modelleme ve optimizasyona yönelik gelişmiş özelliklerle malzeme akışlarını, enerji sistemlerini ve endüstriyel süreçleri simüle etmeye yönelik modüller sağlar. Umberto, imalat ve kimya gibi sektörlerde kaynak verimliliğini en üst düzeye çıkarmak ve emisyonları azaltmak için sıklıkla kullanılmaktadır [140].

Son olarak Ecochain Technologies tarafından geliştirilen, şirket sürdürülebilirliği analizine yönelik eksiksiz bir platform olan Ecochain'den bahsedilebilir. Veriye dayalı içgörüler, şeffaf tedarik zincirleri ve kapsamlı yaşam döngüsü değerlendirmeleri sağlayan program, entegrasyon ve senaryo analizi araçlarıyla işletmelerin akıllıca kararlar almasını ve çevresel etkiyi teşvik etmesini destekler [141].



Şekil 6.2 ReCiPe modeli yapısı [136]

6.4 GaBi Yazılımı ve Yaşam Döngüsü Analizi

GaBi, Sphera Solutions tarafından geliştirilen kapsamlı bir YDA modelleme ve raporlama yazılımı olup, çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan önde gelen ticari YDA yazılım araçlarından biridir [40].

6.4.1 GaBi yazılımının Tanımı ve Özellikleri

GaBi yazılımı, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin yürütülmesi için kapsamlı bir modelleme ortamı sağlayarak, ürün yaşam döngüsü boyunca verimli modelleme, analiz, raporlama ve karar almayı mümkün kılmaktadır. GaBi'nin temel özelliklerinden bazıları şunlardır;

YDA için modelleme yetenekleri: GaBi, bir ürünün veya sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek için ayrıntılı yaşam döngüsü modelleri oluşturmaya olanak tanımaktadır. Yazılım, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin kapsamını tanımlamak ve Yaşam Döngüsü Envanteri (Life Cycle Inventory: LCI) modelini oluşturmak için esnek bir modelleme ortamı sağlamaktadır [141].

Yaşam Döngüsü Envanteri modellemesi: GaBi, incelenen ürün sistemi için LCI modelini oluşturmaya yönelik güçlü bir modelleme ortamı sağlamakta olup, her yaşam döngüsü aşamasıyla ilişkili girdi ve çıktıları belirleyerek ürün sisteminin tanımlanmasına ve LCI modelinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır [142].

Modelleme parametreleri, araçları ve senaryoları: GaBi, YDA çalışması için çeşitli parametrelerin ve senaryoların modellenmesine olanak tanırken ürün sistemi üzerindeki etkilerini analiz etmek için ürün özellikleri, üretim süreçleri, nakliye senaryoları ve diğer değişkenler gibi parametrelerin tanımlanmasını ve değiştirilmesini desteklemektedir. Ayrıca model oluşturma, parametre tanımlama, senaryo analizi ve etki değerlendirmesi gibi özelliklerle esnek bir modelleme ortamı sağlamaktadır [143].

Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (Life Cycle Impact Assessment: LCIA): GaBi, incelenmekte olan ürün sistemi için LCIA'nın yürütülmesini desteklemektedir. Etki kategorilerinin, karakterizasyon faktörlerinin tanımlanmasına ve yaşam döngüsü aşamaları boyunca potansiyel çevresel etkilerin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır [144].

Raporlama ve analiz: GaBi, ayrıntılı raporlar oluşturmak, verileri görselleştirmek ve YDA sonuçlarını analiz etmek için olanak sağlamakta olup çevresel etkilerin raporlanmasını ve karar alma için sonuçların değerlendirilmesini desteklemektedir [40].

Entegrasyon yetenekleri: GaBi, diğer sistem ve araçlara bağlanmak için entegrasyon yetenekleri sunarak verimli veri alışverişi ve analizine olanak tanıyarak veri alışverişini, analizi ve karar almayı kolaylaştırmak için çeşitli platform ve sistemlerle entegrasyonu desteklemektedir [143].

6.4.2 GaBi ile Yaşam Döngüsü Yapmanın Avantajları ve İşleyişi

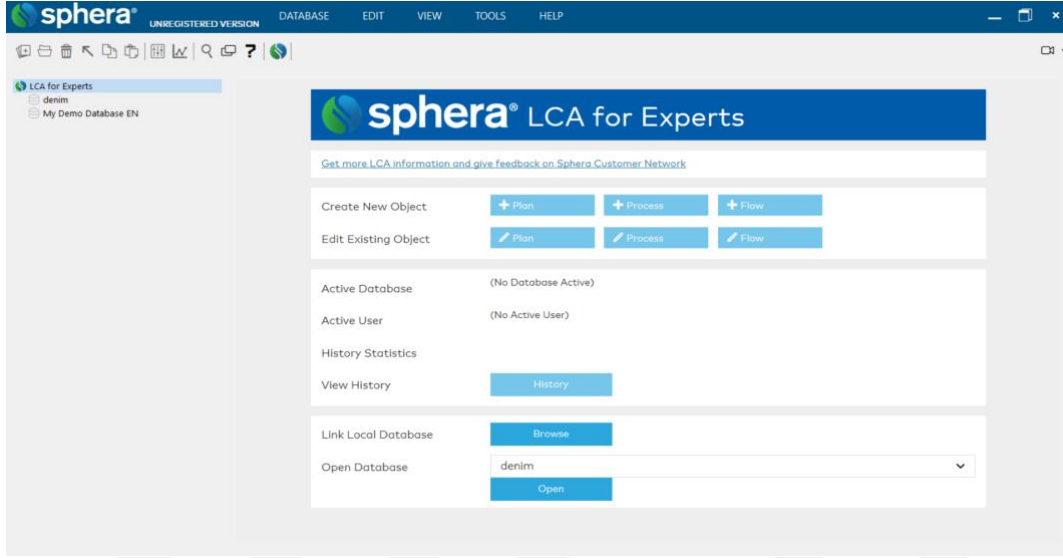
GaBi, kullanıcıların ürünlerin, süreçlerin ve sistemlerin tam Yaşam Döngüsü Analizlerinin yürütülmesine olanak tanıyıp, parametreleri ve girdileri ayarlayarak YDA modellerini özelleştirme esnekliği sunar ve sürdürülebilir ürün tasarımını desteklemek için senaryo karşılaştırması, eko tasarım ve durum analizi gibi özellikler içerir [40], [143]. Yazılım, bu yetenekleri, birden fazla sektörde yıllık olarak güncellenen 15.000'den fazla çevresel veri kümesini içeren kapsamlı veri tabanlarına erişimle birleştirmektedir [145].

Ayrıca bir kuruluşun çevresel ayak izine ilişkin bütünsel bir görünüm sağlamak amacıyla karbon muhasebesi yazılımı gibi diğer sürdürülebilirlik araçlarıyla sorunsuz bir şekilde GaBi tarafından bütünleştirilmektedir [146]. Karbon Varlık Geliştirme (Carbon Asset Development: CAD), Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (Product Lifecycle Management: PLM) ve Kurumsal Kaynak Planlaması (Enterprise Resource Planning: ERP) gibi mevcut BT sistemlerine bağlanarak portföy çapında verimli YDA değerlendirmelerine olanak tanıyan GaBi yazılımı ek olarak kullanıcıların bir ürünün yaşam döngüsü boyunca maliyet faktörlerini anlamalarına ve sürdürülebilir ürünler sunarken operasyonel maliyetleri azaltma fırsatlarını belirlemelerine yardımcı olan Yaşam Döngüsü Maliyetlemesine katkı sağlamaktadır [147].

Çevresel ve ekonomik etki değerlendirmelerinin yanı sıra GaBi, ürün pazarlama ve etiketleme için Çevresel Ürün Beyanları (Environmental Product Declaration: EPD) oluşturarak analizin etkili bir şekilde raporlanmasını ve iletişimini kolaylaştırır, çeşitli sürdürülebilirlik standartlarına ve düzenlemelerine uyumu destekler ve özelleştirilmiş sürdürülebilirlik raporlarının oluşturulmasına olanak tanır [148]. Yazılım ve modelleme süreçleri için kullanıcı dostu bir grafik arayüzüne sahip olan GaBi, YDA sonuçlarının sağlamlığını ve güvenilirliğini artıran hassasiyet analizi, senaryo analizi ve parametre değişimi için farklı araçlar içermektedir [144].

Özet olarak GaBi yazılımı, kapsamlı modelleme yetenekleri, veri tabanları ve diğer sürdürülebilirlik araçlarıyla entegrasyonu nedeniyle çeşitli sektörlerdeki işletmeler, hükümetler ve araştırma kurumları tarafından Yaşam Döngüsü Analizlerinin kullanımında geniş çapta benimsenmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında proses ve arıtmada kullanılan kimyasallar YDA'ya dahil edilmemiş olup, kot yıkama sırasında kullanılan pomza taşının yaşam döngüsüne etkisi incelenmiştir. Pantolonun makinelere aktarılması olan işlemin ilk aşamasında pomza taşı kullanılmış olup, 6,4 g/L litre ölçeğinde pomza taşı kullanımı için hesaplamalar yapılmıştır. Pomza taşının yaşam döngüsü etki parametrelerini belirlemek için GaBi yazılım programının Ecoinvent v.3.7 sürümü kullanılmıştır. Yazılımın arayüzünün görüntüsü Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.3 Sphera Gabi yazılımı ara yüzü

7.1 Denim Üretim Süreci Yıkama Prosesi Yaşam Döngüsü Analizi

Sonuçları

Firmadan elde edilen veriler doğrultusunda pomza taşı ile yıkama işlemi sırasında tesise hazır olarak gelen pantolonların küçük makinalara yüklenerek 25 °C’de 55 dakika boyunca yıkama işleminin gerçekleştirildiği bilinmektedir. Bu işlem sırasında 6,4 g/L pomza taşı kullanılmaktadır.

Kot boyama prosesine ait pomza taşı kullanım değerleri tesisten temin edilen veriler doğrultusunda yıllık olarak oranlanmış olup Ecoinvent v.3.7 sürümünde işlenmiştir. Tesisten temin edilen kot boyama prosesine ait pomza taşı kullanım verileri yıllık olarak oranlanmış olup, oluşturulan plana girdi ve çıktılar halinde eklenerek sürecin çevresel etkisi 14 farklı etki kategorisinde incelenmiş olup bunlar; Asitlenme Potansiyeli, Küresel Isınma Potansiyeli, İnsan Toksisitesi Potansiyeli (hem kanserojen hem de kanserojen olmayan), Ekotoksisite, Ötrofikasyon Potansiyeli (tatlı sular, deniz ve karasal ortamlar), Ozon Tüketimi Potansiyeli, Arazi Kullanımı, Su Kullanımı, Partikül Madde, Fotokimyasal Ozon Oluşumu ve İyonlaştırıcı Radyasyonun İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkisi şeklindedir. Yaşam Döngüsü Analizi kapsamında değerlendirilen etki kategorilerinin ilgili indikatörleri Tablo 7.1’de özetlenmiştir.

Tablo 7. 1 YDA etki kategorileri göstergeleri [149]

YDA Etki Kategorisi	İndikatör	Birimi
<i>Asitlenme potansiyeli</i>	Nitrojen oksitler ve kükürt oksitler gibi gazların salınımı nedeniyle toprak ve suyun potansiyel asitleşmesi	Mole of H ⁺
<i>Küresel ısınma potansiyeli</i>	Sera gazı emisyonlarının havaya salınması nedeniyle potansiyel küresel ısınmadaki artış	kg CO ₂
<i>İnsan toksisite potansiyeli- kanserojen</i>	Çevreye yayılan kansere bağlı toksik maddeler insanlar üzerindeki etkisi	CTUh
<i>İnsan toksisite potansiyeli- kanserojen olmayan</i>	Çevreye yayılan kansere bağlı olmayan toksik maddeler insanlar üzerindeki etkisi	CTUh
<i>Ekotoksisite (tatlı sular)</i>	Çevreye yayılan toksik maddelerin tatlı su organizmaları üzerindeki etkisi	CTUe
<i>Ötrofikasyon toksisite potansiyeli- tatlı su ekosistemi</i>	Fosfor içeren bileşiklerin emisyonu nedeniyle tatlı su ekosisteminin besin öğeleri açısından zenginleşmesi	kg P
<i>Ötrofikasyon toksisite potansiyeli- deniz ekosistemi</i>	Azot içeren bileşiklerin emisyonu nedeniyle deniz ekosisteminin besin öğeleri açısından zenginleşmesi	kg N
<i>Ötrofikasyon toksisite potansiyeli- karasal ekosistem</i>	Azot içeren bileşiklerin emisyonu nedeniyle karasal ekosistemin besin öğeleri açısından zenginleşmesi	Mole of N
<i>Ozon tüketme potansiyeli</i>	Stratosferik ozon tabakasının tahrip olmasına neden olan emisyonların artması	kg CFC-11

Tablo 7. 2 YDA etki kategorileri göstergeleri (devamı) [149]

<i>Arazi Kullanımı</i>	Toprak kalitesindeki değişikliklerin ölçülmesi	Pt
<i>Su Kullanımı</i>	Bölgesel su kıtlığı faktörlerine dayalı olarak kullanılan göreceli su miktarı	m ³
<i>Partikül Madde</i>	Partikül madde emisyonlarından kaynaklanan potansiyel hastalık görülme sıklığındaki artış	kg PM _{2,5}
<i>Fotokimyasal Ozon Oluşumu</i>	Güneş ışığı tarafından katalize edilen alt atmosferde fotokimyasal ozon oluşumunu etkileyen gaz emisyonları	kg NMVOC
<i>İyonlaştırıcı Radyasyon, İnsan Sağlığı</i>	Radyonüklit emisyonlarına bağlı olarak insan sağlığına ve ekosistemlere verilen zarar	kBq U235

Sphera programında incelenen etki kategorilerine ilişkin ayrıntılı hesaplamalar ve değerlendirmeler, sürecin çevresel sonuçlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamak amacıyla sunulmakta olup, YDA çalışmasının sonuçları Tablo 7.2'de yer almaktadır.

Tablo 7. 3 Etki kategorilerine göre yaşam döngüsü analizi sonuçları

YDA Etki Kategorisi	Analiz Sonuçları	Birimi
<i>Asitlenme potansiyeli</i>	2,40*10 ²	Mole of H ⁺
<i>Küresel ısınma potansiyeli</i>	1,85*10 ⁵	kg CO ₂

Tablo 7. 4 Etki kategorilerine göre yaşam döngüsü analizi sonuçları (devamı)

<i>İnsan toksisite potansiyeli- kanserojen</i>	$8,95 \cdot 10^{-5}$	CTUh
<i>İnsan toksisite potansiyeli- kanserojen olmayan</i>	$6,64 \cdot 10^{-4}$	CTUh
<i>Ekotoksosite</i>	$2,85 \cdot 10^3$	CTUe
<i>Ötrofikasyon toksisite potansiyeli- tatlı su ekosistemi</i>	1,99	kg P
<i>Ötrofikasyon toksisite potansiyeli- deniz ekosistemi</i>	8,830	kg N
<i>Ötrofikasyon toksisite potansiyeli- karasal ekosistem</i>	$9,47 \cdot 10^2$	Mole of N
<i>Ozon tüketme potansiyeli</i>	$5,54 \cdot 10^{-4}$	kg CFC-11
<i>Arazi Kullanımı</i>	$-1,35 \cdot 10^4$	Pt
<i>Su Kullanımı</i>	$3,36 \cdot 10^6$	m ³
<i>Partikül Madde</i>	$1,27 \cdot 10^{-3}$	kg PM _{2,5}
<i>Fotokimyasal Ozon Oluşumu</i>	$2,48 \cdot 10^2$	kg NMVOC
<i>İyonlaştırıcı Radyasyon, İnsan Sağlığı</i>	$2,97 \cdot 10^3$	kBq U235

Yaşam Döngüsü Etki kategorisine ilişkin sonuçlar, çeşitli birimler halinde sunulmuştur ve her etki kategorisinin bulguları bağımsız olarak değerlendirilir ve birleştirilemez.

Elde edilen yaşam döngüsü analiz sonuçları incelendiğinde, bazı etki kategorisi sonuçların negatif olduğu gözlenmektedir ve bu sonuçlar değerlendirilen ürün veya sürecin genel olarak faydalı bir çevresel etkiye sahip olduğunu, karşılaştırılan temel veya referans senaryoya göre daha düşük veya daha az önemli olduğunu göstermektedir [150].

7.1.1 Asitlenme Potansiyeli

Asitlenme potansiyeli (Acidification potential), asidik maddelerin çevreye salınmasından kaynaklanır ve bu maddeler daha sonra kara ve su kaynaklarına sızar. Asitleşme potansiyelini belirleyen faktörler, SO₂ eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilir ve öncelikli olarak H⁺ iyonları üreterek asit birikmesine katkıda bulunma kapasiteleriyle bilinen SO₂, NO_x, HCl, NH₃ ve HF gibi bileşiklere atfedilir [151].

Pomza taşıyla denim yıkama işleminin yaşam döngüsü analizindeki asitlenme potansiyeli etki kategorisi, öncelikle enerji tüketimiyle ilişkili kükürt dioksit (SO₂) ve nitrojen oksit (NO_x) emisyonlarından etkilenir. Spesifik olarak, asitlenme potansiyeline en büyük katkıyı sağlayan, eğirme işlemi sırasında tüketilen enerji olup asit yıkama gibi bazı denim yıkama proseslerinde sodyum hipokloritin kullanılması da asitlenme potansiyeli etkisine katkıda bulunur [152]. Nergis ve diğerleri [153] tarafından gerçekleştirilen çalışmada denim yıkama prosesindeki geleneksel ve sürdürülebilir yöntemlerin yaşam döngüsü analiz sonuçları incelendiğinde, sürdürülebilir yıkama sayesinde asitlenme potansiyelinin %33 azaltıldığı gözlemlenmiştir.

Asitlenme potansiyeli değerleri tipik olarak “Mole of H⁺” eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilmekte olup çalışma kapsamında 2,40*10² Mole of H⁺ olarak ölçülmüştür.

7.1.2 Küresel Isınma Potansiyeli

Küresel ısınma potansiyeli (Global Warming Potential: GWP), CO₂, N₂O, CH₄ gibi sera gazlarının ve uçucu organik bileşiklerin (Volatile Organic Compounds: VOCs) atmosfere salınımının sera etkisine katkısını değerlendirmektedir [154].

İklim için seçilen karakterizasyon faktörü yaygın olarak kullanılan küresel ısınma potansiyeli olup GWP değerleri genellikle CO₂ eşdeğeri birimlerle ifade edilir ve küresel ısınma etkilerini değerlendirmek için seçilen zaman diliminden etkilenir [155]. Bu zaman dilimi, 20 veya 50 yıl gibi daha kısa sürelerden 100 veya 500 yıl gibi daha uzun dönemlere kadar değişebilir ve GWP sera gazlarının iklim üzerindeki kısa ve uzun vadede değişen etkilerini yansıtır [154]. Yıkama prosesinde sodyum hidroksit ve sodyum hipoklorit gibi kimyasalların kullanımı, bunların üretimi ve uygulamasıyla ilişkili emisyonlar GWP'ye önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Su kullanımı GWP'ye doğrudan katkıda bulunmasa da su arıtma ve pompalama için gereken enerji GWP'yi dolaylı olarak etkilemektedir. Yıkama sürecinin oldukça enerji yoğun olması ve bu elektriğin fosil yakıtlardan elde edilmesi durumunda GWP etkisi özellikle yükselmektedir [156]. Nergis ve diğerleri [153] tarafından gerçekleştirilen çalışmada küresel ısınma potansiyelinin daha düşük enerji talebi ve geleneksel süreçte daha yüksek GWP'ye önemli bir katkıda bulunan sodyum hipokloritin bulunmaması nedeniyle sürdürülebilir yöntemlerle %35 azaldığı gözlemlenmiştir.

Küresel ısınma potansiyeli değerleri tipik olarak kg CO₂ eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilmekte olup, çalışma kapsamında $1,85 \times 10^5$ kg CO₂ olarak ölçülmüştür.

7.1.3 İnsan Toksisite Potansiyeli

İnsan toksisite potansiyeli (Human toxicity potential), insan sağlığına zararlı kimyasalların kara, su kütleleri ve hava dahil olmak üzere çevreye boşaltılmasından kaynaklanır. Toksikolojik faktörler tipik olarak toksik elementlerin kabul edilebilir veya tolere edilebilir günlük alım seviyelerine göre değerlendirilir [157].

Pomza taşıyla denim yıkama işleminin yaşam döngüsü analizindeki küresel insan toksisite potansiyeli, çeşitli faktörlerden önemli ölçüde etkilenir. Sodyum hidroksit ve sodyum hipoklorit gibi kimyasalların geleneksel yıkama işlemimde kullanımı önemli bir etken olup insan toksisitesi üzerindeki önemli etkisi özellikle belirtilmiştir [25]. Ayrıca, yıkama işleminden kaynaklanan atıksu ve atıksuyun deşarjı, insan toksisitesini oldukça etkileyen toksik maddeler içerebilir [158].

İnsan toksisite potansiyeli değerleri kanserojen ve kanserojen olmayan olarak iki ayrı kategori halinde değerlendirilmektedir. İnsan toksisite potansiyeli değerleri CTUh (Comparative Toxic Unit for humans) eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilmektedir ve çalışma kapsamında kanserojen kategorisi için $8,95 \cdot 10^{-5}$ CTUh ve kanserojen olmayan kategorisi için $6,64 \cdot 10^{-4}$ CTUh değerlerinde ölçülmüştür.

7.1.4 Ekotoksisite

Ekotoksisite (Eco-toxicity) tatlı su ekosistemlerine salınan maddelerin balıklar ve bitkiler gibi su yaşamına nasıl zarar verebileceğini değerlendirir. Daha az zarar veren maddeleri tercih ederek çevresel risklerin belirlenmesine ve sürdürülebilir uygulamalara yönelmeye yardımcı olur [159].

Sarıc ve diğerleri [160] tarafından pomza taşı kullanılarak denim yıkama prosesinin yaşam döngüsü analizi çalışmasında küresel tatlı sulara ekotoksisite potansiyeli etki kategorisi incelenmiş olup, etkiye dair spesifik niceliksel bilgi sağlamamaktadır. Ancak proste kullanılan sodyum hidroksit ve sodyum hipoklorit gibi kimyasalların atıksu ve atıksular yoluyla ekotoksisite etkilerine katkıda bulunduğu belirtilmektedir [25].

Pomza taşı yerine sentetik taşlar gibi sürdürülebilir alternatif malzemelerin kullanılmasının, kimyasal kullanımını ve atıksu oluşumunu azaltarak ekotoksisite etkilerini azaltabileceğini öne sürmektedir [161].

Ekotoksisite değerleri tipik olarak CTUe (Comparative Toxic Unit for ecosystems) eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilmektedir ve çalışma kapsamında $2,85 \cdot 10^3$ CTUe olarak ölçülmüştür.

7.1.5 Ötrofikasyon Potansiyeli

Ötrofikasyon potansiyeli (Eutrophication potential), başta tarım veya bitki yetiştirme faaliyetlerinden kaynaklanan aşırı gübreleme nedeniyle su ekosistemlerindeki besin seviyelerinin, özellikle de fosfor ve nitrojenin artışı ifade eder. Kirliliğe benzeyen bu aşırı besin yükü, alg çoğalmasına ve diğer biyokütle büyümesine yol açarak sudaki besin zincirini bozabilir [162]. Ötrofikasyon potansiyeli, N_2 , NO_x , NH_4^+ , P, PO_4^{3-} dahil nitrojen ve fosfor türevlerinin deşarjı ve PO_4^{3-} seviyelerine göre kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) dikkate alınarak ölçülür [163].

Ötrofikasyonun besin düzeylerini çevresel etkiden etkilenen yerel organizmalara zarar verebilecek ölçüde değiştirmesi nedeniyle biyolojik çeşitlilik de daha fazla risk altına girmektedir [164]. Pomza taşı yıkama işleminde kullanılan kimyasalların, besin açısından zengin atıksular ve atıksu yoluyla ötrofikasyona katkıda bulunabilir. Ek olarak, bu süreçteki yüksek su tüketimi, boşaltılan atıksuyun su kütlelerinde alg oluşumunu teşvik etmesi durumunda ötrofikasyon potansiyelini dolaylı olarak etkileyebilir [161].

Nergis ve diğerleri [153] tarafından gerçekleştirilen çalışmada sürdürülebilir yıkama sayesinde ötrofikasyon potansiyelinin geneksel yöntemlere kıyasla %26 azaltıldığı gözlemlenmiştir. Ötrofikasyon potansiyeli değerleri tatlı su, deniz ve karasal olarak üç ayrı kategori halinde değerlendirilmektedir.

Ötrofikasyon toksisite potansiyeli değerleri her bir kategori için farklı eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilmekte olup, çalışma kapsamında olarak tatlı su kategorisi için 1,99 kg P, deniz kategorisi için 8,830 kg N ve karasal kategorisi için $9,47 \cdot 10^2$ Mole of N olarak ölçülmüştür.

7.1.6 Ozon Tüketme Potansiyeli

Ozon tüketme potansiyeli (Ozone depletion potential), öncelikle kloroflorokarbon (CFC) bileşikleri nedeniyle ozon tabakasındaki azalmayı ölçer [165]. Ozon tabakası, ultraviyole (UV) radyasyon, görünür ışık ve H, OH, NO, Cl ve Br gibi bazı katalizör maddeler tarafından yok edilir. Bir maddenin ozon tüketme potansiyeli, stratosferik ozon sütununda, söz konusu maddenin emisyon miktarının kararlı durumda bu sütundaki değişime göre neden olduğu, kararlı durumdaki CFC-11 (Chlorofluorocarbon-11) emisyonlarındaki değişiklik olarak tanımlanabilir [160]. Denim üretimi sırasında belirli kimyasalların kullanılması ve enerji tüketiminin ozon tüketimini etkileyebileceği bilinmektedir. Denim üretiminde pomza taşının yıkama işleminde kullanılması istenen estetik etkiyi elde etmek için aşındırıcı bir madde olduğundan, ozon tabakasının incelmesine doğrudan neden olmamakla birlikte elektrik kullanımından kaynaklı dolaylı şekilde katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle, denim üretiminin yaşam döngüsü analizinde ozon tüketme potansiyeli, önemli bir çevresel etki kategorisi olsa da, pomza taşı yıkama işleminin bu etki kategorisine katkıda bulunduğu kaynaklar açıkça ölçülmemekte veya çok düşük değerlere ulaşılmaktadır [161].

Ozon tüketme potansiyeli değerleri tipik olarak kg CFC-11 eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilmekte olup çalışma kapsamında $5,54 \cdot 10^{-4}$ kg CFC-11 olarak ölçülmüştür.

7.1.7 Arazi Kullanımı

Arazi Kullanımı (Land use), habitat kaybı ve arazi örtüsündeki değişiklikler gibi faktörler de dahil olmak üzere ürün veya faaliyetlerin arazi kaynakları üzerindeki etkisini değerlendirir. Bu etki kategorisi sonuçları sürdürülebilir arazi yönetimi uygulamalarını teşvik etmek ve olumsuz etkileri en aza indirmek için fırsatların belirlenmesine yardımcı olur [166].

Denim üretimi bağlamında arazi kullanımı etkisi öncelikle pamuk ekimi ve pomza taşı madenciliği ile ilişkilidir. Pomza taşlarının madenciliği arazi bozulmasına, habitatın bozulmasına ve toprak erozyonuna yol açabilir [167] Arazi kullanımı etkisinin pomza taşının çıkarılması ve taşınmasının yanı sıra yıkama işlemi sırasında oluşan atıkların depolanması ve bertarafından etkilendiği bilinmektedir [168]. Pomza taşı yıkama işlemi için arazi kullanımı etki kategorisine ilişkin doğrudan niceliksel bir değerlendirme sunmasa da, denim üretiminin daha geniş bağlamında arazi kullanımı etkilerinin dikkate alınmasının önemini ve bu etkileri hafifletmek için daha sürdürülebilir uygulamalara olan ihtiyacı vurgulamaktadır [164].

Arazi kullanımı değerleri tipik olarak kişi eşdeğeri (Person equivalent: Pt) eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilmekte olup, çalışma kapsamında $-1,35 \cdot 10^4$ Pt olarak ölçülmüştür.

7.1.8 Su Kullanımı

Su Kullanımı (Water use), tüketim, kirlilik ve tükenme gibi faktörleri dikkate alarak ürün veya faaliyetlerin su kaynaklarını nasıl etkilediğini inceler. Ürünün yaşam döngüsü boyunca su kalitesi ve kullanılabilirliği üzerindeki potansiyel çevresel etkilerinin belirlenmesi ve ele alınması açısından çok önemlidir [151]. Pomza taşıyla denim yıkama işleminin yaşam döngüsü analizindeki Su Kullanımı etki kategorisi, su tüketimi ve kirlenmeyle ilgili önemli endişelerin altını çizmektedir. İşlem, yıkama sırasında pomza taşının hızlı bir şekilde çözünmesini içerir ve bu da suya büyük miktarda partikül madde salınımına sebep olmaktadır.

Bu durum yüksek su tüketimine ve kirlilik seviyelerine yol açmaktadır [158]. Geleneksel pomza taşı yıkama yöntemleri aynı zamanda kapsamlı durulama ve temizleme döngülerini de gerektirerek su tüketimini daha da artırır. Soorty'nin pomza taşlarını ortadan kaldıran Sıfır Taş yıkama işleminin, geleneksel taş yıkama yöntemlerine kıyasla %43 daha az su tükettiği gözlemlenmiştir [169]. Pomza taşı yıkamayla ilişkili yüksek su tüketimi sadece yıkamanın kendisinden değil, aynı zamanda ortaya çıkan atıksuyun yönetilmesi ihtiyacından da kaynaklanmaktadır. Üretilen atıksu, atıksu arıtma sistemlerini zorlayan ve su kirliliğine katkıda bulunan yüksek düzeyde partikül ve kirletici madde içermektedir [170]. Su kullanımı değerleri tipik olarak m^3 eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilmekte olup, çalışma kapsamında $3,36 \cdot 10^6 m^3$ değerinde ölçülmüştür.

7.1.9 Partikül Madde

Partikül Madde (Particulate matter: PM), bir ürünün yaşam döngüsü boyunca ince parçacıkların atmosfere emisyonunu analiz eder. Partikül madde emisyonlarıyla bağlantılı çevre ve sağlık tehlikelerinin tanımlanmasına ve yönetimine yardımcı olarak insan sağlığı, ekosistemler ve hava kalitesi üzerindeki potansiyel etkileri değerlendirir [151]. Pomza taşıyla denim yıkama işleminin yaşam döngüsü analizindeki Partikül Madde etki kategorisi, yıkama sırasında pomza taşından küçük parçacıkların salınmasını içerir [164]. Bu durum önemli çevresel kaygılara yol açmaktadır. Pomza taşının hızlı çözünmesi suya büyük miktarda partikül madde salarak kirlenmeye ve atıksu arıtma sistemlerinde yükün artmasına neden olur. Yüksek hacimli partikül madde, çevresel etkilerini azaltmak için verimli atıksu yönetimi uygulamalarını gerektirmektedir [171]. Genel olarak Partikül Madde etki kategorisi, pomza taşı yıkama işlemi sırasında üretilen, su kalitesini ve atıksu yönetimini etkileyen yüksek hacimli partiküllerle ilişkili önemli çevresel kaygıları vurgulamaktadır [172].

Partikül madde değerleri tipik olarak $PM_{2,5}$ (Particulate Matter 2.5) eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilmekte olup çalışma kapsamında $1,27 \cdot 10^{-3} PM_{2,5}$ olarak ölçülmüştür.

7.1.10 Fotokimyasal Ozon Oluşumu

Fotokimyasal Ozon Oluşumu (Photochemical ozone formation), ozon tabakasının incelmesine katkıda bulunan emisyonları inceleyerek ilgili çevresel ve sağlık risklerini değerlendirir. Bu etki kategorisi, emisyonlardan kaynaklanan ozon tabakası bütünlüğü ve insan sağlığı üzerindeki etkilerin belirlenmesine ve ele alınmasına yardımcı olur [173]. Pomza taşıyla denim yıkama prosesinin yaşam döngüsü analizindeki fotokimyasal ozon oluşumu etki kategorisi, duman oluşumuna katkıda bulunan yer seviyesinde ozonun oluşmasıyla ilgili çevresel etkilere odaklanmaktadır [156]. Bu etki, işlem sırasında uçucu organik bileşiklerin (VOCs) ve nitrojen oksitlerin (NO_x) salınmasından kaynaklanmaktadır. Önemli katkılar arasında sodyum hipoklorit gibi kimyasalların kullanımı ve özellikle fosil yakıtlarla çalıştırıldığında yıkama işleminin enerji yoğun yapısı yer alır [174]. Bu emisyonlar insan sağlığına zararlıdır ve solunum sorunlarına neden olmaktadır [175].

Hem yıkama işleminden kaynaklanan doğrudan emisyonlar hem de enerji üretiminden kaynaklanan dolaylı emisyonlar, fotokimyasal ozon oluşumunda önemli rol oynamakta ve daha sürdürülebilir yıkama yöntemlerine olan ihtiyacın altını çizmektedir [161].

Fotokimyasal ozon oluşumu değerleri tipik olarak kg NMVOC (Non-Methane Volatile Organic Compounds) eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilmekte olup çalışma kapsamında $2,48 \times 10^2$ kg NMVOC olarak ölçülmüştür.

7.1.11 İyonlaştırıcı Radyasyon- İnsan Sağlığı

İyonlaştırıcı Radyasyon, İnsan Sağlığı (Ionising radiation, human health) bir ürünün veya sürecin yaşam döngüsü boyunca iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmanın insanlar için potansiyel sağlık sonuçlarını inceler. Bu parametre, yüksek kanser olasılığı, genetik değişiklikler ve radyasyona maruz kalmayla ilişkili diğer sağlık sorunları gibi risklerin değerlendirilmesini içerir [176]. Bu kategori öncelikle radyoaktif madde emisyonlarına ve özellikle enerji nükleer enerjiden geliyorsa yıkama işlemi sırasında tüketilen enerjiye odaklanmaktadır. Nükleer enerji üretimi yakıt üretimi, işletme ve atık imha aşamaları sırasında radyoaktif emisyonlara yol açabileceğinden, bu temel hususlar elektrik kaynağını içerir [160].

Kanser ve radyasyona maruz kalmanın neden olduğu genetik hasar gibi insan sağlığı riskleri hem çalışanlar hem de genel nüfus için değerlendirilmektedir. [177]. Radyoaktif emisyonlar toprağı ve su kütlelerini kirletebileceğinden iyonlaştırıcı radyasyonun çevresel etkileri de dikkate alınır [178]. Genel olarak bu kategori, pomza taşıyla denim yıkama işleminin çevre ve sağlık üzerindeki etkilerini değerlendirirken enerji kaynaklarını ve bunların radyoaktif emisyonlarını dikkate almanın önemini vurgulamaktadır [179]. Arvidsson'a göre en büyük iyonlaştırıcı radyasyon etkileri, kot pantolonun kullanımı ve kullanım ömrünün son aşamasında, özellikle de kot pantolonun yıkanması ve kurutulması sırasında meydana gelmektedir [180].

İyonlaştırıcı radyasyon değerleri tipik olarak kBq U235 (kiloBecquerel Uranium-235) eşdeğer birimleri cinsinden ifade edilmekte olup, çalışma kapsamında $2,97 \cdot 10^3$ kBq U235 değerinde ölçülmüştür.

7.2 Denim Üretim Süreci Yıkama Prosesi Kaynaklı Emisyon Hesaplamaları

Pomza taşı ile yıkama prosesindeki elektrik ve su tüketim verileri günlük/aylık olarak şirketten temin edilmiş olup, elektrik tüketiminden kaynaklı yıllık CO₂ eşdeğeri emisyon hesaplamalarında T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı referans verileri kullanılırken, su tüketiminden kaynaklı yıllık CO₂ eşdeğeri emisyon hesaplamalarında GHG (Greenhouse Gas) 2023 referans verileri kullanılmıştır. Her yükleme işleminde makineler 4 adet pantolon yüklenmekte olduğu ve küçük makineler için 1 dakikalık enerji tüketiminin 0,16kW/dk olduğu bilinmekte olup, 55 dakikalık yıkama için ise toplam 8,8 kWh enerji tüketildiği hesaplanmıştır. Ek olarak her yükleme işleminde yeraltından temin edilen ve ters ozmoz yöntemiyle arıtılan 70 L su kullanılmaktadır.

7.2.1 Elektrik tüketiminden kaynaklı emisyon hesaplamaları

Elektrik tüketimine bağlı emisyonların hesaplanmasında Eşitlik (1)'den yararlanılmıştır. Tüm hesaplamalar firmanın yılın 300 günü ve 8 saatlik 3 vardiya şeklinde çalıştığı varsayılarak yapılmıştır.

Pomza taşı ile yıkama işlemindeki elektrik tüketimi yıllık 63,360 kWh olarak hesaplanmış olup, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan Türkiye genelinde 1 MWh (birim) brüt elektrik üretimi başına ortalama 0,439 ton CO₂ eşdeğeri sera gazı emisyonu verisi [181] ve Denklem (1) kullanılarak elektrik tüketimi yıllık CO₂ eşdeğeri 27,815 ton CO₂ değerinde hesaplanmıştır.

$$E_{tCO_2} = [(ET \times EF)] \times 10^{-3} \quad (7.1)$$

Burada, ET Elektrik Tüketimi (kWh), EF ise Emisyon faktörüdür (kg CO₂/kWh).

7.2.2 Su tüketimi kaynaklı emisyon hesaplamaları

Elektrik tüketimine bağlı emisyonların hesaplanmasında Eşitlik (2)'den yararlanılmıştır. Pomza taşı ile yıkama işlemindeki su tüketimini yıllık 504,000 L hesaplanmış olup, GHG Protokolü tarafından 2023 yılında yayımlanan çevirim faktörlerinde m³ su üretimi başına 0,20100 kg CO₂ eşdeğeri sera gazı emisyonu verisi [182] kullanılarak su tüketimini yıllık CO₂ eşdeğeri 0,10130 ton CO₂ değerinde hesaplanmıştır.

$$E_{tCO_2} = [(ST \times EF)] \times 10^{-3} \quad (7.2)$$

Burada, ST Su Tüketimi (L), EF ise Emisyon faktörüdür (kg CO₂/m³)

7.3 Denim Üretim Süreci Yıkama Prosesinin Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi

Denim yıkama işlemi, yoğun su kullanımı, yüksek enerji tüketimi, kimyasal kirlilik ve atık oluşumu nedeniyle önemli çevresel ayak iziyle bilinen denim üretiminde kritik bir aşamadır. Bu olumsuz etkileri azaltmak ve sürdürülebilirliği teşvik etmek için çeşitli yenilikçi ve çevre dostu alternatifler geliştirilmiştir. Bu alternatifler, malzemelerin yeniden kullanımını ve geri dönüşümünü en üst düzeye çıkararak sürdürülebilirliği teşvik ederken atık ve kaynak tüketimini azaltmayı amaçlayan döngüsel ekonominin ilkeleriyle uyumludur [183].

Denim yıkama prosesindeki döngüsel ekonomi ilkeleri, israfın en aza indirilmesine, kaynak kullanımının optimize edilmesine ve denim ürünlerinin ömrünün maksimuma çıkarılmasına odaklanmaktadır. Bu ilkeler, daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir üretim süreci yaratmayı amaçlayan çeşitli stratejiler ve teknolojiler aracılığıyla uygulanabilir [15].

Denim üretim prosesinde, kapalı döngü geri dönüşüm sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması, gerçek anlamda sürdürülebilir bir denim üretim süreci oluşturmak için çok önemlidir [183]. Kot boyalı denim gibi kavramlar, denim atıklarının nasıl etkili bir şekilde yeni ürünlere dönüştürülebileceğini göstermektedir [184]. Denim atıklarına yönelik ayırma ve işleme tekniklerinin iyileştirilmesi, üretim döngüsüne yeniden dahil edilebilecek daha yüksek kalitede geri dönüştürülmüş elyafların üretilmesini sağlar. Bu gelişmeler yalnızca denimin geri dönüşümünü desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda geri dönüştürülmüş ürünlerin genel kalitesini ve sürdürülebilirliğini de arttırmaktadır [185].

Denim yıkama işlemi sırasında ve sonrasında çevreye etkisi daha az olan çevre dostu kimyasalların kullanılması, döngüsel ekonomi ilkelerini entegre ederek denim yıkama süreci daha sürdürülebilir hale gelebilir, çevresel ayak izini azaltabilir ve kaynakların daha verimli kullanımını teşvik edebilir. Bu yaklaşım yalnızca çevreye fayda sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda denim sektörünün uzun vadeli sürdürülebilirliğini de desteklemektedir [174]. Ayrıca kimyasalları yıkama sürecinde filtrelemek ve geri kazanmak için kullanılan teknolojiler, kimyasalların yeniden kullanılmasını sağlayarak döngüsel ekonomiye katkı sağlamaktadır. Bu sadece ihtiyaç duyulan kimyasal miktarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kimyasal atıkları azaltarak çevresel etkilerini de en aza indirir [186]. Bunların yanı sıra ürünlerin kullanım ömrünün uzatılması, denim giysilerin onarılması, yeniden kullanılması ve ileri dönüştürülmesinin teşvik edilmesi, denim yıkamada kullanılan kaynaklara olan ihtiyacı azaltmaktadır [187]. Kot kiralama hizmetleri gibi yenilikçi iş modelleri, denim giysilerin nihai olarak geri dönüştürülmeden önce birden fazla kullanım döngüsüne olanak tanımaktadır [188].

Taş yıkama ve kimyasal yıkama gibi geleneksel yıkama yöntemleri, büyük miktarda su, enerji ve kimyasal kullanımını içerir ve bu da önemli miktarda atıksu üretimine ve kirliliğe yol açar. Bu yöntemler aynı zamanda pomza taşları ve çeşitli kimyasal maddeler gerektirir; bu da kaynakların tükenmesine ve çevresel bozulmaya katkıda bulunur [15]. Denim üretiminde sürdürülebilir yıkama tekniklerine geçiş, sektörün çevresel etkisini azaltmak açısından hayati önem taşımakta olup, Ereks-Blue Matters firması tarafından pomza taşı kullanımı yerine F-Stone kullanımına yönelik araştırmalar ve çalışmalar devam etmektedir.

7.3.1 F-Stone ile sürdürülebilir denim yıkama prosesi

F-Stone, denim yıkama işleminde geleneksel pomza taşlarının yerine çevre dostu bir alternatif olarak kullanılan sentetik bir taştır [21]. Maksimum dayanıklılık ve performansa sahip, geri dönüştürülebilir malzemelerden yapılmış, sürdürülebilir bir taş alternatifi olarak denim yıkama proseslerinde kullanımı yaygınlaşmaktadır. F-taşının kullanıldığı yıkama uygulamasında geleneksel pomza taşlarına kıyasla yıkama işleminde ihtiyaç duyulan su miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sayede su kullanımını en aza indirerek ve pomza taşı madenciliği ihtiyacını ortadan kaldırarak çevresel ayak izini azaltmaktadır [22].

Bunun yanı sıra pomza taşı kullanımında yıkama işleminden sonra çamur oluşurken, F-taşının kimyasalları absorbe etmemesi özelliği sayesinde zararlı çamur atığı oluşmamaktadır. Atık çamur oluşturmadığı için atıksu arıtma prosesindeki kullanılan su miktarı önemli ölçüde azalmakta olup çamur yönetimine gereksinimi ortadan kaldırmaktadır. Bu da pomza taşına kıyasla oldukça sürdürülebilir ve çevreye duyarlı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Geri dönüştürülebilir özelliğe sahip olan F-taşı, denim yıkama işleminin verimliliğini ve maliyet etkinliğini artırarak birden çok kez yeniden kullanılabilir. Ek olarak daha kontrollü ve tutarlı bir yıkama işlemi sağlayarak denimde aşırı aşınma ve yıpranma olmadan yüksek dayanıklılıkla sürekli üretim sağlamaktadır [23].

F-taşı, ECO Passport tarafından onaylanmış olup, tekstil ve deri endüstrisinde kullanılan kimyasallara yönelik, güvenlik ve sürdürülebilirlik standartlarını karşılamalarını sağlayan bir sertifikasyona sahiptir [22]. Bu pasaport sayesinde çevre dostu kimyasalların kullanımını teşvik eder, ürün kalitesini artırır ve pazar güvenini artırır. Uluslararası düzenlemelere uygunluğu doğrulayarak insan sağlığını ve çevreyi korurken küresel pazarlara erişimi kolaylaştırmaktadır [24].

Tekstil ürünleri, gıda, barınma ve ulaşımdan sonra birincil hammadde ve su kullanımında dördüncü, sera gazı emisyonlarında ise beşinci en yüksek baskı kategorisindedir, 2025 Sürdürülebilir Pamuk Mücadelesi Kontrol Paneli tarafından desteklenen F-taşı, tekstil endüstrisinde arzu edilen denim bitişlerini elde etmek için sürdürülebilir ve etkili bir alternatif olmaktadır [189].

Bu tez çalışmasında, tekstil endüstrisinde ele alınan denim kot firmasının yaşam döngüsü analizi ve karbon dioksit eşdeğerleri farklı metotlar ile incelenmiştir. Yapılan YDA çalışması ile denim kumaşlar için çevresel etki değerlendirme çerçevesi değerlendirilmiştir. YDA, ham madde çıkarma, üretim, dağıtım, kullanım ve imha konularına odaklanarak tekstil ürünlerinin yaşam döngüsünün bütünsel bir değerlendirmesini sağlayabilir. Bu metodoloji, üretimdeki yüksek enerji maliyetlerini ve kirlilik aşamalarını belirleyebilir ve değer zinciri boyunca mevcut en iyi teknolojilerin geliştirilmesini destekleyebilir.

Taz kapsamında, firmanın tesise hazır halde gelen pantolonların pomza taşı ile yıkama prosesinde yer alan pomza taşının yaşam döngüsü analizi 14 farklı çevre etki kategorisinde GaBi yazılım programının Ecoinvent v.3.7 sürümü ile beşikten kapıya mentalitesiyle değerlendirilmiş olup, her bir yıkama için küresel ısınma potansiyeli $1,85 \cdot 10^5$ kg CO₂ eşdeğerinde ölçülmüştür ve en yüksek etki kategorisine sahip parameter olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç, denimin üretiminde kullanılan pomza taşının tüm yaşam döngüsü boyunca, hammadde elde etme, üretim, nakliye, kullanım ve bertaraf süreçleri dahil olmak üzere sera gazı emisyonlarını dikkate almaktadır.

Pomza taşı ile yıkama prosesinde kullanılan 70 litre suyun karbon ayak izi hesaplandığında 0,000101 kg CO₂ sonucuna ulaşılmıştır ve diğer etkenlere kıyasla çok daha düşük bir çevresel etkiye sahip olduğu gözlemlenmiş olsa da çevresel etkilerinin azımsanamayacağı söylenebilir. Bu nedenle, YDA çalışmaları ile su kullanımını değerlendirerek çevresel etkileri azaltmak ve sürdürülebilir su yönetimi planlarını oluşturmak mümkün olabilmektedir.

Pomza taşı ile yıkama prosesinde tüketilen 8,8 kWh enerjinin yıllık karbon dioksit eşdeğeri hesaplandığında 27815 kg CO₂ sonucuna ulaşılmıştır ve elektrik tüketimiyle ilişkili CO₂ eşdeğer emisyonlarının çeşitli kaynaklarının çevresel etkilerinin dikkate alınması gereken bir ölçüde olduğu gözlemlenmiştir.

Bu veriler ışığında tekstil endüstrisinde kullanılan pomza taşının yerine özellikle denim giysiler için terbiye işlemlerinde kullanılan yenilikçi bir malzeme olan F-Stone (Köpük Taşı)'nın kullanılması önerilmektedir. Çevre açısından sürdürülebilirdir, geri dönüştürülebilir malzemelerden üretilmiş olan F-Stone 6.000'den fazla yıkamaya dayanan yüksek dayanıklılığa sahiptir ve kimyasalları emmez veya zararlı çamur oluşturmaz. Aynı zamanda düşük oranda mikroplastik salınımına sahip olduğundan çevre kirliliğini de azaltır. Geri dönüştürülebilirliği döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu olup, malzeme geri kazanımını destekler.

Özet olarak, gelecekteki trendler ve fırsatlar arasında sürdürülebilir kalkınma için çok önemli olan döngüsel giyim sistemleri ve uzun ömürlülük odaklı giysi tasarımında YDA verilerini kullanarak ürün geliştiricilerin ve/veya tasarımcıların tekstil sektöründe yaptıkları seçimlerin etkilerini hesaplama fırsatı sunmaktadır. Bu ayrıntılı bilime dayalı verilerin hesaplanması ve paylaşılması aynı zamanda yeni bir şeffaflık düzeyini de temsil etmektedir.

-
- [1] M. S. Paulraj, S. Nuzhat, and C. M. Hussain, *Source reduction and waste minimization*. Elsevier, 2021.
 - [2] S. Snoek, "Circular economy in the textile industry. Transition theory in start-ups in the textile industry," *February*, vol. 95, 2017.
 - [3] A. Nicita and S. Razzaz, *Who benefits and how much?: how gender affects welfare impacts of a booming textile industry*. World Bank Publications, 2003.
 - [4] J. Keane and D. W. Te Velde, "The role of textile and clothing industries in growth and development strategies," *Overseas Development Institute*, vol. 7, no. 1, pp. 141-147, 2008.
 - [5] B. English, "Global women's work: historical perspectives on the textile and garment industries," *Journal of International Affairs*, pp. 67-82, 2013.
 - [6] Z. He, J. Xu, K. P. Tran, S. Thomassey, X. Zeng, and C. Yi, "Modeling of textile manufacturing processes using intelligent techniques: a review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 116, no. 1, pp. 39-67, 2021.
 - [7] A. Roy Choudhury, "Environmental impacts of the textile industry and its assessment through life cycle assessment," *Roadmap to sustainable textiles and clothing: environmental and social aspects of textiles and clothing supply chain*, pp. 1-39, 2014.
 - [8] S. S. Muthu, *Assessing the environmental impact of textiles and the clothing supply chain*. Woodhead publishing, 2020.
 - [9] M. Bhattacharjee, A. K. Dhar, M. M. Islam, and M. A. Rashid, "Development of washing effects on reactive dyed denim fabrics: a value added approach of denim wash," *Int J Text Sci*, vol. 8, no. 2, pp. 41-48, 2019.
 - [10] J. Sarkar and E. Khalil, "Effect of industrial bleach wash and softening on the physical, mechanical and color properties of denim garments," *IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 46-49, 2014.
 - [11] C. G. PLC, "Denim Wash Technical Bulletin," London, 2016.
 - [12] A. Choudhury, "Environmental impacts of denim washing," in *Sustainability in Denim*: Elsevier, 2017, pp. 49-81.
 - [13] A. P. Periyasamy and S. Periyasami, "Critical review on sustainability in denim: A step toward sustainable production and consumption of denim," *ACS omega*, vol. 8, no. 5, pp. 4472-4490, 2023.
 - [14] D. Arjun, J. Hiranmayee, and M. Farheen, "Technology of industrial denim washing," *International Journal of Industrial Engineering & Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 25-34, 2013.
 - [15] M. K. R. Khan and S. Jintun, "Sustainability issues of various denim washing methods," *Textile & Leather Review*, vol. 4, no. 2, pp. 96-110, 2021.

- [16] M. A. B. Siddiquee, A. G. Moula, J. K. Saha, M. H. K. Khan, Z. Kaisar, and A. Roy, "Sustainable Denim Washing by Process Optimization," *Journal of Textile Science and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 149-162, 2022.
- [17] M. I. H. Mondal and M. M. R. Khan, "Characterization and process optimization of indigo dyed cotton denim garments by enzymatic wash," *Fashion and Textiles*, vol. 1, pp. 1-12, 2014.
- [18] G. K. Group. "Replace pumice stones in denim washing." <https://shorturl.at/IoqYh> (accessed 02.06.2024, 2024).
- [19] S. o. Green. "Enzymes Make Your Jeans Less Thirsty." <https://stateofgreen.com/en/news/enzymes-make-your-jeans-less-thirsty/> (accessed 02.06.2024, 2024).
- [20] G. K. Group. "Stone Washing " <https://www.garmonchemicals.com/en/textile-chemicals/garment-denim-finishing/enzyme-stone-washing> (accessed 02.06.2024, 2024).
- [21] D. Chattopadhyay and R. D. Pachauri, "Preparation of synthetic stones for denim washing and analysis of wash effects," *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 24-28, 2012.
- [22] K. Tekstil. "F-Stone 2020." <https://kaisertekstil.com/en/f-stone-2020/> (accessed 09.06.2024, 2024).
- [23] K. Tekstil. "F-Stones' recyclability makes it a 'forever product', says Kaiser." <https://kaisertekstil.com/en/f-stones-recyclability-makes-it-a-forever-product-says-kaiser/> (accessed 09.06.2024, 2024).
- [24] O.-T. Association, "Application ECO PASSPORT by OEKO-TEX®," 2021.
- [25] A. P. Periyasamy, "Environmental hazards of denim processing-I," *Asian Dyer*, vol. 17, no. 1, pp. 56-60, 2020.
- [26] M. University, "What is Sustainability?," 2022.
- [27] K. E. Portney, *Sustainability*. MIT Press, 2015.
- [28] P. E. Hardisty, *Environmental and economic sustainability*. Crc Press, 2010.
- [29] A. Longoni and R. Cagliano, "Environmental and social sustainability priorities: Their integration in operations strategies," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 35, no. 2, pp. 216-245, 2015.
- [30] U. Nations. "THE 17 GOALS." Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/goals> (accessed 03.06.2024, 2024).
- [31] M. Ribul, A. Lanot, C. T. Pisapia, P. Purnell, S. J. McQueen-Mason, and S. Baurley, "Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles," *Journal of Cleaner Production*, vol. 326, p. 129325, 2021.
- [32] I. M. Sandvik and W. Stubbs, "Circular fashion supply chain through textile-to-textile recycling," *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 366-381, 2019.

- [33] A. Payne, "Open-and closed-loop recycling of textile and apparel products," in *Handbook of life cycle assessment (LCA) of textiles and clothing*: Elsevier, 2015, pp. 103-123.
- [34] Wikipedia. "Life-cycle assessment." https://en.wikipedia.org/wiki/Life-cycle_assessment (accessed 04.06.2024, 2024).
- [35] W. Klöpffer and B. Grahl, *Life cycle assessment (LCA): a guide to best practice*. John Wiley & Sons, 2014.
- [36] A. Bhatt, A. Bradford, and B. E. Abbassi, "Cradle-to-grave life cycle assessment (LCA) of low-impact-development (LID) technologies in southern Ontario," *Journal of environmental management*, vol. 231, pp. 98-109, 2019.
- [37] M. Braungart and W. McDonough, *Cradle to cradle*. Random House, 2009.
- [38] B. Steen, "Environmental costs and benefits in life cycle costing," *Management of Environmental Quality: An International Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 107-118, 2005.
- [39] N. Van den Berg, G. Huppes, and C. Dutilh, "Beginning LCA. A guide into environmental life cycle assessment," 1995.
- [40] Sphera. "LCA for Experts (GaBi)." <https://sphera.com/life-cycle-assessment-lca-software/> (accessed 04.06.2024, 2024).
- [41] B. Esi, "Türk tekstil endüstrisi ve gelişimi," *Journal of Awareness (JoA)*, vol. 2, no. Special, pp. 643-663, 2017.
- [42] S. Sameková, "Textile and Clothing industry-Salvation or course of Developing countries-The case of Bangladesh," ed: Mendel University, República Checa. Recuperado el, 2018.
- [43] C. Ünlütürk and S. Öngel, "For fair fashion: improving due diligence, wages, and gender," 2023.
- [44] F. Uddin, *Textile manufacturing processes*. BoD–Books on Demand, 2019.
- [45] M. Hann, *Textile design: products and processes*. CRC Press, 2020.
- [46] R. S. Kumar, *Process management in spinning*. CRC Press, 2014.
- [47] J. Bullon, M. A. González Arrieta, M. A. Hernández Encinas, and M. A. Queiruga Dios, "Manufacturing processes in the textile industry. Expert Systems for fabrics production," 2017.
- [48] P. K. Banerjee, *Principles of fabric formation*. CRC press, 2014.
- [49] K. Wells, *Fabric dyeing and printing*. 93965, 2000.
- [50] A. K. R. Choudhury, *Principles of textile finishing*. Woodhead Publishing, 2017.
- [51] C.-Y. Liong and N. A. A. Rahim, "A simulation study on garment manufacturing process," in *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol. 1643, no. 1: American Institute of Physics, pp. 460-466.
- [52] (2017). 2007TR16IPO001.3.06/SER/42, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Alanında Kapasitesinin Güçlendirilmesi İçin Teknik Yardım Projesi.

- [53] Statista. "Production volume of chemical and textile fibers worldwide from 1975 to 2022." <https://www.statista.com/statistics/263154/worldwide-production-volume-of-textile-fibers-since-1975/> (accessed 01.06.2024, 2024).
- [54] E. B. Recktenwald and R. A. Ehrhardt, "Greenhouse gas emissions from a diversity of sheep production systems in the United States," *Agricultural Systems*, vol. 217, p. 103915, 2024.
- [55] V. Gonzalez, X. Lou, and T. Chi, "Evaluating environmental impact of natural and synthetic fibers: a life cycle assessment approach," *Sustainability*, vol. 15, no. 9, p. 7670, 2023.
- [56] H. Company. "The environmental impact of the textile sector." <https://www.hhc.earth/knowledge-base/the-environmental-impact-of-the-textile-sector> (accessed 01.06.2024, 2024).
- [57] C. R. Holkar, A. J. Jadhav, D. V. Pinjari, N. M. Mahamuni, and A. B. Pandit, "A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches," *Journal of environmental management*, vol. 182, pp. 351-366, 2016.
- [58] S. Khan and A. Malik, "Environmental and health effects of textile industry wastewater," *Environmental deterioration and human health: Natural and anthropogenic determinants*, pp. 55-71, 2014.
- [59] J. Kim, C. Yun, Y. Park, and C. H. Park, "Post-consumer energy consumption of textile products during 'use' phase of the lifecycle," *Fibers and Polymers*, vol. 16, pp. 926-933, 2015.
- [60] F. De Falco, E. Di Pace, M. Cocca, and M. Avella, "The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution," *Scientific reports*, vol. 9, no. 1, p. 6633, 2019.
- [61] J. M. Allwood, S. E. Laursen, C. M. de Rodriguez, and N. M. Bocken, "Well dressed?: The present and future sustainability of clothing and textiles in the United Kingdom," *Journal of the Home Economics Institute of Australia*, vol. 22, no. 1, p. 42, 2015.
- [62] A. Bartl, "End-of-life textiles," in *Waste*, 2019: Elsevier, pp. 323-336.
- [63] E. Parliament. "The impact of textile production and waste on the environment (infographics)." <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20201208STO93327/the-impact-of-textile-production-and-waste-on-the-environment-infographics> (accessed 01.06.2024, 2024).
- [64] E. Parliament, "Environmental impact of the textile and clothing industry: What consumers need to know," 633.143, 2019.
- [65] E. Commision. "Circular economy for textiles: taking responsibility to reduce, reuse and recycle textile waste and boosting markets for used textiles." https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_3635 (accessed 01.06.2024, 2024).
- [66] Y. Elmogahzy, *Engineering textiles: Integrating the design and manufacture of textile products*. Woodhead Publishing, 2019.

- [67] S. Li, J. E. Lewis, N. M. Stewart, L. Qian, and H. Boyter, "Effect of finishing methods on washing durability of microencapsulated aroma finishing," *The Journal of The Textile Institute*, vol. 99, no. 2, pp. 177-183, 2008.
- [68] DUER. "The Denim Washing Process." <https://shopduer.com/blogs/uncuffed/denim-washing-process> (accessed 02.06.2024, 2024).
- [69] A. Zareen *et al.*, "Washing Effects Investigation on Physical Properties of Denim Fabric," *North American Academic Research*, vol. 2, no. 7, pp. 209-217, 2019.
- [70] S. Kumar Ramamoorthy, A. P. Periyasamy, and S. S. Lavate, "Eco-friendly Denim Processing," 2018.
- [71] J. Ahamed *et al.*, "Evaluate the strength of denim goods using different washing technique," *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, vol. 9, no. 03, p. 1, 2021.
- [72] E. Csanák, "Sustainable concepts and Eco-Friendly technologies in the Denim industry," in *International Conference on Design and Light Industry Technologies. Budapest, Hungary. Óbuda University*, 2014, pp. 1-6.
- [73] M. A. H. Shibly, M. M. Hoque, and S. Miah, "Development of eco-friendly denim fabric washing by natural resources," *Int J Text Sci*, vol. 10, pp. 1-6, 2021.
- [74] M. Khan and S. Jintun, "Sustainability Issues of Various Denim Washing Methods. Textile & Leather Review. 2021; 4 (2): 96-110," ed, 2021.
- [75] V. Technology. "Sustainability for the Future." <https://vavtechnology.com/sustainability/> (accessed 2024).
- [76] U. K. Sarker, N. Kawser, A. Rahim, A. Al Parvez, and M. I. Shahid, "Superiority of sustainable ozone wash over conventional denim washing technique," *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 11, no. 5, pp. 516-522, 2021.
- [77] A. G. Hassabo *et al.*, "Denim manufacturing and washing as a fashioned garments," *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, vol. 20, no. 2, pp. 203-216, 2023.
- [78] D. Zhu, Z. Wan, X. Zhao, S. Liao, Q. Wang, and C. Yi, "Foaming indigo: An efficient technology for yarn dyeing," *Dyes and Pigments*, vol. 197, p. 109862, 2022.
- [79] T. Adane, A. T. Adugna, and E. Alemayehu, "Textile industry effluent treatment techniques," *Journal of Chemistry*, vol. 2021, pp. 1-14, 2021.
- [80] S. STEIDINGER. "Sustainable Denim Alternatives To Conventional Stone Wash." <https://long-john.nl/sustainable-denim-alternatives-to-conventional-stone-wash/> (accessed 26.06.2024, 2024).
- [81] L. M. Q. SA, "Pumice stone- Environmental Product Declaration," 2021.
- [82] I. Ivedi and A. Çay, "Use of Natural and Synthetic Materials in Denim Washing Process as an Alternative to Pumice Stone," *Textile and Apparel*, vol. 33, no. 1, pp. 68-76, 2023.

- [83] I. Z. Ansari, "Impact of stone wash and acid wash on the physical properties of denim," *International Journal of Engineering Research*, vol. 6, no. 12, pp. 499-501, 2017.
- [84] S. Safdie, "What are the Three Pillars of Sustainable Development?," in *Greenly Earth* vol. 2024, U. Copywriter, Ed., ed. New York, 2024.
- [85] H. Herath and R. Rathnayake, "A critical approach towards sustainable development models—A review," *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, vol. 7, no. 4, pp. 2319-1473, 2019.
- [86] A. McKinnon, "Environmental sustainability," *Green logistics: improving the environmental sustainability of logistics*. London, 2010.
- [87] J. Ikerd, *The essentials of economic sustainability*. Lynne Rienner Publishers, 2012.
- [88] U. Nations, "The Sustainable Development Goals Report," New York, 2019.
- [89] K. İ. H. Derneği. "SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA HEDEFLERİ (2030 GÜNDEMİ)." <https://kadinininsanhaklari.org/savunuculuk/uluslararasi-sozlesmeler-ve-mekanizmalar/surdurulebilir-kalkinma-hedefleri/> (accessed 03.06.2024, 2024).
- [90] J. D. Sachs, G. Schmidt-Traub, M. Mazzucato, D. Messner, N. Nakicenovic, and J. Rockström, "Six transformations to achieve the sustainable development goals," *Nature sustainability*, vol. 2, no. 9, pp. 805-814, 2019.
- [91] U. Nations. "Goal 17: Revitalize the global partnership for sustainable development." <https://www.un.org/sustainabledevelopment/globalpartnerships/> (accessed 03.06.2024, 2024).
- [92] K. E. Lee, "Environmental sustainability in the textile industry," *Sustainability in the textile industry*, pp. 17-55, 2017.
- [93] P. Wakelyn and M. Chaudhry, "Organic cotton: production practices and post-harvest considerations," in *Sustainable textiles*: Elsevier, 2009, pp. 231-301.
- [94] K. Amutha, "Sustainable practices in textile industry: standards and certificates," *Sustainability in the textile industry*, pp. 79-107, 2017.
- [95] R. Johnson and C. Southard, "Explorative materials & sustainable fashion in the fashion industry," 2024.
- [96] G. O. T. Standard, "Global Organic Textile Standard," *Recuperado el*, vol. 27, 2008.
- [97] M. Á. Gardetti, "Sustainability in the textile and fashion industries: Animal ethics and welfare," *Textiles and clothing sustainability: implications in textiles and fashion*, pp. 47-73, 2017.
- [98] G. Groves, C. Buckley, and R. Turnbull, "Closed looped recycle systems for textile effluents," *Journal (Water Pollution Control Federation)*, pp. 499-517, 1979.

- [99] T. Profi, "Sustainable practices in the Textile Industry," vol. 2024, ed. Netherlands, 2024.
- [100] K. Farhana, K. Kadirgama, A. S. F. Mahamude, and 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*, vol. 4, no. 1, p. 15, 2022.
- [101] *TEKSTİL SEKTÖRÜNDE KARBON AYAK İZİNİ AZALTMA YOLLARI*.
- [102] S. Grace Annapoorani, "Social sustainability in textile industry," *Sustainability in the textile industry*, pp. 57-78, 2017.
- [103] R. Rathinamoorthy, "Circular fashion," in *Circular economy in textiles and apparel*: Elsevier, 2019, pp. 13-48.
- [104] P. Özkan and E. K. Yücel, "Linear economy to circular economy: Planned obsolescence to cradle-to-cradle product perspective," in *Handbook of research on entrepreneurship development and opportunities in circular economy*: IGI Global, 2020, pp. 61-86.
- [105] P. Ekins, T. Domenech Aparisi, P. Drummond, R. Bleischwitz, N. Hughes, and L. Lotti, "The circular economy: What, why, how and where," 2020.
- [106] S. Geisendorf and F. Pietrulla, "The circular economy and circular economic concepts—a literature analysis and redefinition," *Thunderbird International Business Review*, vol. 60, no. 5, pp. 771-782, 2018.
- [107] Semtrio, "Döngüsel Ekonomi Modeli: Tanımı, Faydaları ve Önemi," vol. 2024, ed.
- [108] A. P. Velenturf and P. Purnell, "Principles for a sustainable circular economy," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 27, pp. 1437-1457, 2021.
- [109] A. Mestre and T. Cooper, "Circular product design. A multiple loops life cycle design approach for the circular economy," *The Design Journal*, vol. 20, no. sup1, pp. S1620-S1635, 2017.
- [110] E. M. Foundation. "What is a circular economy?" <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> (accessed 03.06.2024, 2024).
- [111] E. Abad-Segura, A. B. d. l. Fuente, M.-D. González-Zamar, and L. J. Belmonte-Ureña, "Effects of circular economy policies on the environment and sustainable growth: Worldwide research," *Sustainability*, vol. 12, no. 14, p. 5792, 2020.
- [112] S. Sehnem, D. Vazquez-Brust, S. C. F. Pereira, and L. M. Campos, "Circular economy: benefits, impacts and overlapping," *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 24, no. 6, pp. 784-804, 2019.
- [113] P. Ghisellini, C. Cialani, and S. Ulgiati, "A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems," *Journal of Cleaner production*, vol. 114, pp. 11-32, 2016.
- [114] M. Valencia, N. Bocken, C. Loaiza, and S. De Jaeger, "The social contribution of the circular economy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 408, p. 137082, 2023.

- [115] A. Padilla-Rivera, S. Russo-Garrido, and N. Merveille, "Addressing the social aspects of a circular economy: A systematic literature review," *Sustainability*, vol. 12, no. 19, p. 7912, 2020.
- [116] B. S. Gerstmann, "Towards circular resource use: the potential of extended producer responsibility for textile circularity in the EU," Wien, 2020.
- [117] E. P. o. E. Commission, "Innovative design practices for achieving a new textile circular sector," in "CIRCULAR ECONOMY IN THE TEXTILE AND FOOTWEAR INDUSTRY," 2018-1-LV01-KA202-046977, 2018.
- [118] J. B. Guinée *et al.*, "Life cycle assessment: past, present, and future," ed: ACS Publications, 2011.
- [119] L. Golsteijn, "Life Cycle Assessment (LCA) explained." [Online]. Available: <https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/>
- [120] A. Omurca. "Yaşam Döngüsü Analizi Nedir?" Malzeme Bilimi.Net. <https://malzemebilimi.net/yasam-dongusu-analizi-nedir.html> (accessed 04.06.2024, 2024).
- [121] A. Fonseca, E. Ramalho, A. Gouveia, R. Henriques, F. Figueiredo, and J. Nunes, "Systematic Insights into a Textile Industry: Reviewing Life Cycle Assessment and Eco-Design," *Sustainability*, vol. 15, no. 21, p. 15267, 2023.
- [122] S. Suh and G. Huppes, "Methods for life cycle inventory of a product," *Journal of cleaner production*, vol. 13, no. 7, pp. 687-697, 2005.
- [123] S. S. Muthu, *Handbook of life cycle assessment (LCA) of textiles and clothing*. Woodhead publishing, 2015.
- [124] L. Jacquemin, P.-Y. Pontalier, and C. Sablayrolles, "Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, pp. 1028-1041, 2012.
- [125] R. M. W. U. Khan and K. Shaker, "Life Cycle Assessment of Textile Products," in *Circularity in Textiles*: Springer, 2023, pp. 159-176.
- [126] E. Alay, K. Duran, and A. Korlu, "A sample work on green manufacturing in textile industry," *Sustainable Chemistry and pharmacy*, vol. 3, pp. 39-46, 2016.
- [127] L. Ranasinghe and V. Jayasooriya, "Ecolabelling in textile industry: A review," *Resources, Environment and Sustainability*, vol. 6, p. 100037, 2021.
- [128] S. Abagnato, L. Rigamonti, and M. Grosso, "Life cycle assessment applications to reuse, recycling and circular practices for textiles: A review," *Waste Management*, vol. 182, pp. 74-90, 2024.
- [129] L. Dahllöf, "Life Cycle Assessment (LCA) applied in the textile sector: the usefulness, limitations and methodological problems—A literature review," 2003.
- [130] J. Guinée, "Life cycle sustainability assessment: what is it and what are its challenges?," *Taking stock of industrial ecology*, pp. 45-68, 2016.

- [131] H. Tian, X. Wang, and Y. W. Tong, "Sustainability assessment: focusing on different technologies recovering energy from waste," *Waste-to-Energy*, pp. 235-264, 2020.
- [132] A. Zamagni, "Life cycle sustainability assessment," vol. 17, ed: Springer, 2012, pp. 373-376.
- [133] Ecomatters. "Life Cycle Assessment (LCA)." <https://www.ecomatters.nl/services/lca-epd/life-cycle-assessment/> (accessed 04.06.2024, 2024).
- [134] Simapro. <https://simapro.com/> (accessed 07.06.2024, 2024).
- [135] P. S. B.V. "ReCiPe." <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/#:~:text=The%20primary%20objective%20of%20the,18%20midpoint%20indicators> (accessed 26.06.2024, 2024).
- [136] N. I. f. P. H. a. t. Environment. "LCIA: the ReCiPe model." <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe> (accessed 26.06.2024, 2024).
- [137] GreenDelta. "openLCA." <https://www.openlca.org/> (accessed 07.06.2024, 2024).
- [138] A. Ciroth, M. Srocka, J. Hildenbrand, A. Moeller, B. Page, and M. Schreiber, "openLCA-Implications of an Emerging Open Source Software for Sustainability Assessment," in *EnviroInfo*, 2008, pp. 435-439.
- [139] T. Leitner, M. Stachura, A. Schiffleitner, and N. Stein, "Challenges of an Efficient Data Management for Sustainable Product Design," in *Glocalised Solutions for Sustainability in Manufacturing: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd-4th, 2011*, 2011: Springer, pp. 554-557.
- [140] i. s. gmbh. "Software Solutions." <https://www.ifu.com/software/> (accessed 07.06.2024, 2024).
- [141] L. Hillege. "Comparison of Top LCA Software – Your Ultimate Guide to LCA Solutions." Ecochain. <https://ecochain.com/blog/life-cycle-assessment-software-overview-comparison/> (accessed 04.06.2024, 2024).
- [142] W. S. Association, "Life cycle inventory (LCI) study- 2020 data release," in "2020 LCI Study Report," 2021.
- [143] M. B. Thilo Kupfer, Cecilia Makishi Colodel, Morten Kokborg, Steffen Schöll, Matthias Rudolf, Ulrike Bos, Fabian Bosch, Maria Gonzalez, Oliver Schuller, Jasmin Hengstler, Alexander Stoffregen, Daniel Thylmann, Chris Koffler, "GaBi Databases & Modelling Principles 2021," 2021.
- [144] P. I. G. a. U. Stuttgart, "GaBi Modelling Principles," in "GaBi Software Product Sustainability," 2007.
- [145] J. H. Steffen Schöll, Alexander Stoffregen, Martin Baitz, Ulrike, Bos, Marc-Andree Wolf, Thilo Kupfer, "GaBi Databases 2022 Edition Upgrades & Improvements," 2022.
- [146] Sphera. "What is Carbon Accounting?" <https://sphera.com/glossary/what-is-carbon-accounting/> (accessed 04.06.2024, 2024).

- [147] Sphera. "LCA Automation." <https://sphera.com/product-sustainability-software/> (accessed 04.06.2024, 2024).
- [148] Sphera. "Environmental Product Declaration (EPD) Services." <https://sphera.com/environmental-product-declarations-epd/> (accessed 04.06.2024, 2024).
- [149] L. Hillege, "Impact Categories (LCA) – The complete overview," vol. 2024, Ecochain, Ed., ed, 2024.
- [150] B. A. Sandén and M. Karlström, "Positive and negative feedback in consequential life-cycle assessment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, no. 15, pp. 1469-1481, 2007.
- [151] A. Simons and C. Bauer, "Environmental Impacts. Chapter 3.[Overview of environmental impacts by employing the life cycle assessment (LCA) methodology]," 2014.
- [152] F. Keller, R. P. Lee, and B. Meyer, "Life cycle assessment of global warming potential, resource depletion and acidification potential of fossil, renewable and secondary feedstock for olefin production in Germany," *Journal of Cleaner Production*, vol. 250, p. 119484, 2020.
- [153] F. Nergis, C. Candan, D. Boy, B. Müjde, and S. N. Dursun, "Water Conscious Blue Jeans Washing Process: A Case Study of Turkey," *Textile and Apparel*, vol. 33, no. 4, pp. 322-329, 2023.
- [154] L. D. Harvey, "A guide to global warming potentials (GWPs)," *Energy Policy*, vol. 21, no. 1, pp. 24-34, 1993.
- [155] I. P. O. C. Change, "Climate change 2007: The physical science basis," *Agenda*, vol. 6, no. 07, p. 333, 2007.
- [156] S. A. N. Assad Farooq, Ifrah Kamil, "Life cycle assessment of reuse and recycle of denim fabric in the textile industry," Pakistan, 2022.
- [157] S. Moazzem, F. Daver, E. Crossin, and L. Wang, "Assessing environmental impact of textile supply chain using life cycle assessment methodology," *The journal of the Textile Institute*, vol. 109, no. 12, pp. 1574-1585, 2018.
- [158] A. Periyasamy, J. Wiener, and J. Militky, "Life-cycle assessment of denim," in *Sustainability in denim*: Elsevier, 2017, pp. 83-110.
- [159] R. K. Rosenbaum, "Ecotoxicity," *Life cycle impact assessment*, pp. 139-162, 2015.
- [160] M. Saric and M. Nellström, "A Comparative Life Cycle Assessment of Nudie Jeans' Repair and Reuse Concept," 2019.
- [161] S. U. Akı, C. Candan, B. Nergis, and N. S. Önder, "Life-Cycle Assessment as a Next Level of Transparency in Denim Manufacturing," in *Life Cycle Assessment-Recent Advances and New Perspectives*: IntechOpen, 2023.
- [162] B. Morelli *et al.*, "Critical review of eutrophication models for life cycle assessment," *Environmental science & technology*, vol. 52, no. 17, pp. 9562-9578, 2018.
- [163] A. D. Henderson, "Eutrophication," *Life cycle impact assessment*, pp. 177-196, 2015.

- [164] H. M. Stone. "Decoding The Carbon Footprint Of Pumice Stone And HMS (Hand Made Stone)." <https://www.hmswashing.com/comparing-the-carbon-footprint-of-pumice-stone-and-hms> (accessed 09.06.2024, 2024).
- [165] J. L. Lane, "Stratospheric ozone depletion," *Life Cycle Impact Assessment*, pp. 51-73, 2015.
- [166] L. De Baan, R. Alkemade, and T. Koellner, "Land use impacts on biodiversity in LCA: a global approach," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, pp. 1216-1230, 2013.
- [167] V. Mannheim and W. Kruszelnicka, "Relation between Scale-Up and Life Cycle Assessment for Wet Grinding Process of Pumice," *Energies*, vol. 16, no. 11, p. 4470, 2023.
- [168] S. U. Akı, C. Candan, B. Nergis, and N. S. Önder, "Understanding denim recycling: A quantitative study with lifecycle assessment methodology," in *Waste in Textile and Leather Sectors*: IntechOpen, 2020.
- [169] L. WARREN. "SOORTY ELIMINATES DENIM'S NEED FOR PUMICE STONES." *Sourcing Journal*. <https://sourcingjournal.com/denim/denim-mills/soorty-zero-stone-wash-method-pumice-stones-water-stewardship-sustainable-312957/> (accessed 15.06.2024, 2024).
- [170] A. Rathore. "Washing Techniques for Denim Jeans." *Textile School*. <https://www.textileschool.com/8554/washing-techniques-for-denim-jeans/> (accessed 15.06.2024, 2024).
- [171] H. Jamshaid, A. W. Rajput, I. Bajwa, and A. Mujeeb, "Effect of different washing methods on denim fabric properties and their effluent's environmental impact," *Mehran University Research Journal Of Engineering & Technology*, vol. 42, no. 3, pp. 33-41, 2023.
- [172] M. A. Bhat, F. N. Eraslan, K. Gedik, and E. O. Gaga, "Impact of textile product emissions: toxicological considerations in assessing indoor air quality and human health," *Ecological and health effects of building materials*, pp. 505-541, 2022.
- [173] P. Preiss, "Photochemical ozone formation," *Life Cycle Impact Assessment*, pp. 115-138, 2015.
- [174] A. P. Periyasamy and J. Militky, "Denim processing and health hazards," in *Sustainability in denim*: Elsevier, 2017, pp. 161-196.
- [175] V. Soni, P. Singh, V. Shree, and V. Goel, "Effects of VOCs on human health," *Air pollution and control*, pp. 119-142, 2018.
- [176] R. Frischknecht, A. Braunschweig, P. Hofstetter, and P. Suter, "Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment," *Environmental impact assessment Review*, vol. 20, no. 2, pp. 159-189, 2000.
- [177] W. H. Organization. "Ionizing radiation and health effects." <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-and-health-effects> (accessed 15.06.2024, 2024).
- [178] I. Smičiklas and M. Šljivić-Ivanović, "Radioactive contamination of the soil: assessments of pollutants mobility with implication to remediation

- strategies," *Soil Contamination–Current Consequences and Further Solutions. Rijeka: InTech [Internet]*, pp. 253-276, 2016.
- [179] A. Periyasamy and J. Militky, "Denim and consumers' phase of life cycle," in *Sustainability in denim*: Elsevier, 2017, pp. 257-282.
 - [180] E. Nales, "Revitalizing Denim: Investigating The Desirability of Using High Recycled Proportions In Jeans Production," MASTER THESIS, MSc Environmental Sciences, Wageningen University, 2023.
 - [181] (2021). *ETKB-EVÇED-FRM-042, Türkiye Elektrik Üretimi Ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri Bilgi Formu*.
 - [182] GOV.UK, "Greenhouse Gas Reporting: Conversion Factors," 7 June 2023. [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2023>
 - [183] C. Economy. "The Future of Denim." <https://www.circle-economy.com/news/the-future-of-denim> (accessed 16.06.2024, 2024).
 - [184] A. Tobin, "Textile Dyeing: The Importance of Choosing the Right Textile Dye," vol. 2024, ed: SupplyCompass, 2022.
 - [185] X. Meng *et al.*, "Recycling of denim fabric wastes into high-performance composites using the needle-punching nonwoven fabrication route," *Textile research journal*, vol. 90, no. 5-6, pp. 695-709, 2020.
 - [186] A. P. Periyasamy, J. Militky, and M. Venkataraman, "Sustainable chemical processing of denim," in *Sustainable Textile Chemical Processing*: CRC Press, 2020, pp. 260-304.
 - [187] C. ECO, "How do you design circular denim? ," vol. 2024, no. 16.06.2024. [Online]. Available: <https://cosh.eco/en/articles/how-to-design-circulaire-denim>
 - [188] S. Thatta and A. Polisetty, "The future is circular: a case study on MUD jeans," *FIIB Business Review*, vol. 11, no. 2, pp. 137-146, 2022.
 - [189] T. Exchange, "2025 Sustainable Cotton Challenge Second Annual Report 2020," 2024 2020.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Emine Şule Tecirli, Hanife Sarı Erkan, Aleyna Birinci, Ali Dogancan Dogan, Yonca Tekyildiz, “Assessing the sustainability of electrocoagulation treatment for textile wastewater in dye production industry and its circular economy potential”, 9th International Conference On Engineering and Natural Sciences (ICENS), 17-21 Mayıs 2023, Saraybosna

