

**POLİESTERİN BOYANMASINDA SUSUZ VE KLASİK
PROSESLERİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ**

Neslihan KARADAĞ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİESTERİN BOYANMASINDA SUSUZ VE KLASİK
PROSESLERİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ**

Neslihan KARADAĞ
501817043

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

POLİESTERİN BOYANMASINDA SUSUZ VE KLASİK PROSESLERİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ

Neslihan KARADAĞ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN

Dünya nüfusunun kontrolsüz bir şekilde artması, bir yandan yaşam standartlarını yükseltmeye yönelik faaliyetler, diğer yandan kıt olan tatlı su kaynakları nedeniyle insanların su kullanım ihtiyaçları gün geçtikçe artmaktadır. Tekstil üretiminin her aşamasında çok fazla miktarda su tüketilmektedir. Bunlardan biri de boyama sırasında harcanan su miktarıdır. Bu sebeple su kullanımının günümüzde hızla artan bir öneme sahip olacağı ön görülmektedir.

Bu çalışmada, poliester ipliğinin boyanmasında susuz, süperkritik karbondioksit (scCO₂) boyama prosesi ile klasik boyama prosesi karşılaştırılmış ve sonuçlar yaşam döngüsü analizi (LCA) yöntemi ile değerlendirilmiştir. Karşılaştırmanın sonucunda susuz boyama prosesinin çevresel etkisi klasik boyamaya göre daha düşük seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Poliester, Klasik Boyama, Süperkritik Boyama, Susuz Boyama, CO₂ ile Boyama, Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)

2022, x + 126 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

LIFE CYCLE ASSESMENT OF WATERLESS AND CONVENTIONAL POLYESTER DYEING

Neslihan KARADAG

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Textile Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN

People's water usage needs are increasing day by day with the uncontrolled increase in the world population and activities aimed at raising the living standards, although the fresh water resources are scarce. A large amount of water is consumed at every stage of textile production. One of them is the amount of water consumed during dyeing. For this reason, it is foreseen that the use of water will have a rapidly increasing importance today.

In this study, anhydrous supercritical carbon dioxide (scCO₂) dyeing process and classical dyeing process were compared in dyeing polyester yarn and the results were evaluated by life cycle analysis (LCA) method. As a result of the comparison, it has been observed that the environmental impact of the waterless dyeing process is lower than the conventional dyeing.

Key words: Polyester, Classic Dyeing, Supercritical Dyeing, Waterless Dyeing, CO₂ Dyeing, Life Cycle Analysis (LCA)

2022, x + 126 pages.

TEŐEKKÖR

Tez alıŐmalarım sırasında desteğini esirgemeyen, bilgi birikimini, tecrÖbesini ve değerli zamanını paylaŐan tez danıŐmanım Sayın Prof. Dr. HÖseyin Aksel EREN ve çalışma boyunca desteğini esirgemeyen Sayın Dr. İdil YETİŐŐİR YİğİT'e, çalıŐmalarım sırasında LCA yazılımını kullandığım çalıŐtıęım kurum BUTEKOM'a, çalıŐmayı gerçekleŐtirdięimiz AKBAŐLAR Tekstil'e, veri toplama aşamasında destek olan evre DanıŐmanı Sn. Turgut ELİORA'ya, tez çalıŐmalarım sırasında benden manevi desteklerini esirgemeyen başta sevgili eŐim İsmail KARADAğ olmak Özere aileme en içten dileklerle teŐekkÖr ederim.

Neslihan KARADAğ
05/01/2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	11
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	14
2.1. Tekstil Ekolojisi /Tekstilde Ekoloji Kavramı.....	14
2.2. Tekstilde Sürdürülebilirlik Kavramı.....	18
2.3. Poliesterin Boyanması.....	21
2.3.1. Poliester elyafının kimyasal yapısı ve özellikleri.....	27
2.3.2. Poliesterin sulu ortamda boyanması.....	28
2.3.3. Poliesterin süperkritik CO ₂ ortamında boyanması.....	30
2.4. Süperkritik CO ₂ 'in Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	33
2.4.1. Tekstil boyamacılığında süperkritik CO ₂ ortamının avantajları.....	41
2.5. Süperkritik CO ₂ Ortamında Boyama ile İlgili Literatürde Yer Alan Çalışmalar.....	44
2.5.1. Süperkritik CO ₂ ortamında çözünürlük ve tekstilde boyama çalışmaları....	47
2.6. Süperkritik CO ₂ Ortamında Boyamanın Ekolojik Açından Değerlendirilmesi.....	50
2.7. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) Nedir?.....	50
2.8. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Tarihçesi ve Geleceği.....	53
2.9. Yaşam Döngüsü Analizi Çevresel Etki Kategorileri.....	56
2.10. Yaşam Döngüsü Analizinin Aşamaları.....	57
2.10.1. Yaşam döngüsü analizi 1. aşama: amaç kapsam ve tanımı.....	58
2.10.2. Yaşam döngüsü analizi 2. aşama: envanter analizi.....	59
2.10.3. Yaşam döngüsü analizi 3. aşama: etki değerlendirmesi.....	60
2.10.4. Etki değerlendirmesi adımları.....	60
2.10.5. Yaşam döngüsü analizi 4. aşama: yorumlama.....	62
2.10.6. Sonuç raporunun hazırlanması.....	63
2.11. Yaşam Döngüsü Analizinin Kullanım Alanları.....	64
2.11.1. Çevre etiketi (eco-label).....	66
2.11.2. Karbon ayak izi.....	69
2.12. LCA Yaklaşımının Kısıtları.....	69
2.13. Yaşam Döngüsü Analizi Çalışmalarında Kullanılan Yazılımlar.....	70
2.14. LCA için Farklı Sektörlerden Örnekler.....	73
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	84
3.1. Çalışmanın Kapsamı.....	84
3.1.1. Sistem sınırları.....	84
3.1.2. Veri gereksinimleri, yazılım ve veritabanları.....	85
3.1.3. Veri hesaplama.....	86
3.1.4. Yaşam döngüsü etki değerlendirme metodolojisi ve değerlendirilen etki kategorileri.....	86

3.2. Çalışmanın Yapıldığı Tekstil Firmasının Tanıtımı.....	87
3.3. Materyaller.....	88
3.3.1. Kumaş.....	88
3.3.2.Boyamada kullanılan boyarmadde ve kimyasal yardımcı malzemeler.....	89
3.3.3.Makine ve metodoloji.....	90
3.4. Yöntemler.....	91
3.4.1. Susuz ve klasik boyama proses akışları.....	91
3.4.2. Yaşam döngüsü analizi (LCA) yöntemi.....	95
3.4.3. Test yöntemleri.....	97
4.BULGULAR.....	98
4.1. Yaşam Döngüsü Envanteri.....	98
4.1.1. Birim proses açıklamaları.....	98
4.2. Veri Toplama.....	98
4.3. Kaynak Tüketimleri.....	99
4.3.1. Doğalgaz.....	100
4.3.2.Buhar.....	101
4.3.3. Elektrik.....	101
4.3.4. Kümülatif Enerji.....	102
4.3.5. Su.....	103
4.4. Atıksu Analizleri.....	103
4.5. Çevresel Etkilerin Karşılaştırılması.....	105
4.5.1. Deniz ekotoksitesitesi.....	107
4.5.2. Küresel ısınma (GWP100a).....	107
4.5.3. İnsan sağlığına etkiler.....	108
4.5.4. Akarsu ekotoksitesitesi.....	109
4.5.5. Karasal ekotoksitesite.....	110
4.5.6. Asidifikasyon.....	111
4.5.7. Ötrofikasyon.....	112
4.5.8. Fotokimyasal oksidasyon.....	113
4.5.9. Doğal kaynakların tükenmesi.....	114
4.5.10. Ozon tabakasının incelenmesi.....	115
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	116
KAYNAKLAR.....	120
EKLER.....	128
ÖZGEÇMİŞ.....	136

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
scCO ₂	Süperkritik Karbondioksit
YDD	Yaşam Döngü Değerlendirmesi
YDA	Yaşam Döngüsü Analizi
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Yaşam Döngüsü Envanteri
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
KOI	Kimyasal Oksijen İndeksi
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AB	Avrupa Birliği
UNFCCC	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
PES	Poliester
PET	Polietilen Teraftelat Bazlı Poliester
PBT	Polibütilen Teraftelat
DMT	Dimetiltriptamin
TPA	Teraftelik Asit
NH ₂	Amino Radikal
(-C)	Ester Fonksiyonel Grupları
CO ₂	Karbondioksit
T _c	Kritik Sıcaklık
P _c	Kritik Basınç
T _g	Camsı Geçiş Sıcaklığı
m ³	Metreküp
SCF	Süperkritik Akışkan
Kg	Kilogram
G	Gram
MPa	Mega Paskal
Psi	Basınç
COD	Kimyasal Oksijen
REPA	Kaynak ve Çevre Profil Analizleri
FFCA	Tam Yakıt Döngüsü Değerlendirmeleri
CACAS	Sürdürülebilirlik Yaşam Döngüsü Analizi İnovasyon
Koordinasyon Eylemi	
YDSA	Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi
HCI	Karakterizasyon Faktörü
SO ₂	Kükürt Dioksit
CH ₄	Metan
CE	Avrupa Uygunluğu
BAT	Mevcut En İyi Teknoloji
BCI	Daha İyi Pamuk Uygulaması
BOİ	Biyolojik oksijen ihtiyacı
AKM	Askıdaki katı maddeler
AP	Asitleşme Potansiyeli
EP	Ötrofikasyon Potansiyeli
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli

ODP
POCP

Ozon Tüketim Potansiyeli
Foto-Oksidan Oluşturma Potansiyeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Sürdürülebilirlik kavramı.....	20
Şekil 2.2. Reaktif bir dispers boyasının yapısı.....	26
Şekil 2.3. Poliester elyafının kimyasal yapısı.....	27
Şekil 2.4. Sulu proses ve susuz (süperkritik) prosesinin işlem akışı.....	32
Şekil 2.5. Süperkritik CO ₂ 'nin şematik basınç-sıcaklık diyagramı.....	34
Şekil 2.6. Karbondioksitin süperkritik akışkan fazına dönüşme aşamaları.....	35
Şekil 2.7. Süperkritik CO ₂ koşullarında kullanılan tipik poliester boyama aparatı.....	38
Şekil 2.8. Süperkritik CO ₂ boyamada boya konsantrasyonunun renk gücü değerlerine etkisi.....	39
Şekil 2.9. Süperkritik CO ₂ boyamada proses sıcaklığının (80, 100 veya 120 °C) renk mukavemeti değerlerine etkisi.....	40
Şekil 2.10. Süperkritik CO ₂ boyamada proses basıncının (5, 10 veya 15 MPa) renk mukavemeti değerleri üzerindeki etkisi	40
Şekil 2.11. Farklı boyaların kimyasal formülleri.....	49
Şekil 2.12. LCA'nın aşamaları.....	52
Şekil 2.13. LCA'nın uygulama alanlarına göre kullanım sıklığı.....	53
Şekil 2.14. Yaşam Döngüsü Analizinin Çevresel Etki Kategorileri.....	56
Şekil 2.15. Yaşam Döngüsü Analizinin Aşamaları.....	58
Şekil 2.16. Orta Nokta-Son Nokta Yaklaşımı.....	61
Şekil 2.17. Eco-Label Logoları.....	67
Şekil 2.18. Blue Angel Etiketleri.....	68
Şekil 2.19. Poliester-pamuk üretim süreci için geliştirilmiş tasarım çerçevesi...	78
Şekil 2.20. Poliester-pamuk üretim sürecinin sistem sınırları.....	79
Şekil 2.21. Poliester-pamuk üretim sürecinde baskı ve boyama aşamasının sistem sınırları.....	79
Şekil 3.1. Sistem sınırlarına dahil edilen ve edilmeyenler	85
Şekil 3.2. Firmaya ait üretim akış şeması.....	88
Şekil 3.3. Jet Boyama Makinası.....	90
Şekil 3.4. Süperkritik boyama proses akışı.....	92
Şekil 3.5. Klasik boyama proses akışı.....	95
Şekil 4.1. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre doğalgaz tüketimi.....	100
Şekil 4.2. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre buhar tüketimi.....	101
Şekil 4.3. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre enerji tüketimi.....	102
Şekil 4.4. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre kümülatif enerji tüketimi.	102
Şekil 4.5. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre su tüketimi.....	103
Şekil 4.6. Susuz ve klasik boyama yöntemine çevresel etkilerin karşılaştırılması.....	105
Şekil 4.7. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre deniz ekotoksitesitesi etkisi.....	107
Şekil 4.8. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre küresel ısınma etkisi.....	108
Şekil 4.9. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre insan sağlığına etkileri....	109
Şekil 4.10. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre akarsu ekotoksitesitesi etkisi.....	109

Şekil 4.11.	Susuz ve klasik boyama yöntemine göre karasal ekotoksitesitesi etkisi.....	110
Şekil 4.12.	Susuz ve klasik boyama yöntemine göre asidifikasyon etkisi.....	111
Şekil 4.13.	Susuz ve klasik boyama yöntemine göre ötrofikasyon etkisi.....	112
Şekil 4.14.	Susuz ve klasik boyama yöntemine göre fotokimyasal oksidasyon etkisi.....	113
Şekil 4.15.	Susuz ve klasik boyama yöntemine göre doğal kaynakların tükenmesi etkisi.....	114
Şekil 4.16.	Susuz ve klasik boyama yöntemine göre ozon tabakasının incilmesi etkisi.....	115

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazı süperkritik akışkanların kritik değerleri.....	31
Çizelge 2.2. Akışkanların fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.....	35
Çizelge 2.3. Geleneksel sulu boyama ile süperkritik CO2 boyamanın karşılaştırılması.....	37
Çizelge 2.4. ISO 14040 Çevre Yönetimi – LCA Serisi.....	55
Çizelge 2.5. Bir sonuç raporunun içeriğın genel olarak bölümleri.....	64
Çizelge 2.6. Geleneksel tişört ve eko tişörtün kimyasal, enerji ve su tüketim değerleri.....	80
Çizelge 2.7. Denim kumaşlara ait MSI (Material Sustainable Index) sonuçları.	81
Çizelge 3.1. Sistem sınırlarının özeti.....	85
Çizelge 3.2. Tez çalışmasında kullanılan kumaşın teknik özellikleri.....	88
Çizelge 3.3. Klasik boyamada kullanılan boyarmadde ve kimyasal yardımcı malzemeler.....	89
Çizelge 3.4. Süperkritik boyamada kullanılan boya ve kimyasallar.....	89
Çizelge 4.1. Boyama yöntemlerine göre girdiler ve çıktılar.....	99
Çizelge 4.2. Boyama yöntemine göre toplam kaynak tüketimleri.....	99
Çizelge 4.3. Atıksu analiz sonuçlar (Firma verileri).....	104
Çizelge 4.4. Susuz ve klasik boyama yöntemine çevresel etkilerin sayısal verileri.....	106

1. GİRİŞ

Tekstilin insan yaşamına yaklaşık 7000 yıl önce girdiği düşünülmektedir. Önceleri giyinme; örtünme, barınma ve korunma ihtiyacı ile başlayan bu sektör, insanlığın doğuşundan beri en temel gereksinimlerinden biri olmuştur. Neredeyse insanlık ile aynı yaşıttır.

Geniş kapsamlı ve çeşitli ürün yelpazesi olan tekstil; ham lif üretimi veya hasat edilmesi ile başlamaktadır. Ham lifin ardından iplik, dokuma, dokusuz yüzey kumaş üretimi veya örme aşamaları sonrasında nihai ürün imalatını da içerisinde barındırmaktadır. Tekstil üretim sektörüne dair girdi-çıktı ve kaynak kullanımları bakımından ele alındığında, çevreye zararlı birçok faktör olduğu, bunun yanı sıra su tüketiminin de önemli derecede yapıldığı görülmektedir.

Bir yandan nüfus artışı, bir yandan yaşam standartlarını yükseltmeye yönelik faaliyetler, diğer yandan kıt olan tatlı su kaynakları nedeniyle insanların su ihtiyacı artmıştır. Bu nedenle günümüzde hızla artan bir öneme sahip olacağı görülmektedir. 2030'lardan sonra dünyanın büyük bir su sıkıntısı yaşayacağı öngörülmektedir. Sınırlı olan tatlı su kaynakları günlük ihtiyaçlar dışında tarım ve sanayide de kullanılması bu su kaynaklarının daha da kirlenmesine yol açmaktadır (Kayaer ve Çiftçi, 2018).

Tekstil endüstrisinde terbiye işlemlerinde büyük miktarda su kullanılmakta ve kullanılan kimyasallarla kirlenen bu suyun bertarafı sırasında ciddi sorunlar yaşanmaktadır (Fernandez, 2005). Tekstil yüzeylerine uygulanan boya-apre işlemleri sırasında kimyasalların çeşitliliği, arıtma sırasında büyük sıkıntılara yol açmaktadır bu sebeple yaş işlemler çevreci olmadığı gibi ekonomikte değildir. Boyama ve apre işlemleri için yeni, alternatif yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Daha az kimyasal ve su kullanımı için yapılan çalışmaların temel amacı çevre dostu boyama ve terbiye prosesleri geliştirmektir (Van Der Kraan, 2005).

Tekstil boyama endüstrisinin neden olduğu büyük ölçekli su kirliliği küresel bir çevre sorunudur. Atıksu ile ilgili her zamankinden daha katı düzenlemeler de bu çevre problemini ekonomik bir sorun haline getirmektedir.

Bu nedenle son yirmi yıldır, su yerine boya çözücü olarak süperkritik karbondioksit (scCO₂) kullanan çevreye zarar vermeyen bir teknoloji üzerinde araştırmalar yapılmaktadır (Van Der Kraan, 2005). Çözücü olarak su yerine alternatif boyama yöntemlerinden biri olan süperkritik karbondioksitin (scCO₂) kullanıldığı susuz boyama yöntemi kapsamında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Süperkritik karbondioksit ile boyama yöntemi su sarfiyatı ve atıksu üretimini ortadan kaldıracakđ düşünölmektedir (Güzel ve Akgerman, 2000).

Tekstil ürünlerinde geri dönüşüm konusunu tek bir başlık altında değerlendirmek, hammaddeler, makine parkı, üretim sırasında kullanılan enerji türleri ve maliyetleri, süreçlerde meydana gelen çevresel etkileşimler ve ürünlerin geri dönüşüm potansiyeli aynı olmadığı için çok zordur. Bir ürün veya hizmeti üretmek için kullanılan tüm ilgili üretim, nakliye, tüketici kullanımı ve kullanım sonrası atık olarak imha dahil olmak üzere kullanılan hammaddelerin edinilmesiyle başlayan araştırma, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) veya yaşam döngüsü analizi (YDA) olarak bilinir. Uluslararası kaynaklarda ise Life Cycle Assessment (LCA) olarak geçmektedir.

Sürdürülebilir üretim uygulamalarının gereksinimlerini karşılamak için, çevresel etkileri azaltmak ve bir ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca üretim kalitesi ve ekonomik faydalar sağlamak için yeşil üretim kavramı ortaya çıkmıştır. Yeşil üretimi gerçekleştirmek için anahtar bir yöntem olarak yeşil tasarım (veya ekolojik tasarım), tüm süreç yönetimi konsepti ile koordineli olarak, üretimin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri en aza indirmek için hem tasarımı hem de ekolojik süreçleri dikkate alan entegre bir yaklaşımdır (Zhang, Kang, Hou, Shao, Sun, Qin ve Zhang, 2018).

LCA, her aşamada bir ürün veya kuruluşun ekolojik etkisini ölçmek için kullanılmaktadır. LCA, bir ürün veya kuruluşun tüm girdi ve çıktılarını beşikten mezara kadar incelemektedir. Bir ürün veya hizmetin hammadde temininden bertarafına kadar olan tüm aşamalarını incelemek için kullanılan analitik bir yöntemdir. ISO 14040 serisi standartlara göre standardize edilen bu yöntem, sadece çevre açısından değil, finansal ve sosyal açıdan da değerlendirilebilir (Demirer, 2011a).

Yapılan tez çalışmasında Poliester ipliğinin boyanmasında susuz süperkritik karbondioksit (scCO₂) ve klasik boyama prosesi karşılaştırılmış ve sonuçlar yaşam döngüsü analizine göre değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile enerji, su tüketim değerleri ve ekolojik etkiler elde edilerek süperkritik ve klasik boyama prosesleri karşılaştırılmıştır. Süperkritik ve klasik boyama proseslerinin karşılaştırılması amaçlanan bu çalışmada malzemelerin taşınması, atıksu arıtma süreçleri, atık değerlendirme yöntemleri gibi süreçler çalışmaya dahil edilmemiştir. Ayrıca bu çalışmada süperkritik ortamdaki boyama bundan sonraki bölümlerde susuz boyama olarak adlandırılacaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Tekstil Ekolojisi /Tekstilde Ekoloji Kavramı

Yüzyıllar boyunca insanların örtünme, giyinme ve korunma talepleri tekstil sektöründe ekonomik üretimi ve ticareti artırmıştır. Tekstil, eski çağlardan günümüze insanlığın en eski kreasyonlarından biridir ve zaman içinde birçok değişikliğe uğramıştır. Tekstil endüstrisinin en temel üretimi giyim, perde ve halıdır. 20. ve 21. yüzyıllarda bilim ve teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte tekstil ürünlerinin kullanımı da çeşitlenmiştir. 20. yüzyılın başlarından itibaren tekstil ürünleri askeriyede, tıpta, otomobil sanayinde, birçok sektörde bina ve üretim tesislerinde ve hatta yol yapımında kullanılmaya başlanmıştır (Esi, 2017).

Tekstil endüstrisi sanayi devriminde büyük rol oynamış olsada, tekstil ve hazır giyim endüstrisi, istihdam olanakları ve ürettiği tekstiller nedeniyle gelişmekte olan ülkelerin ekonomik kalkınmasında önemli bir rol oynamıştır. Üretim sürecinde oluşturduğu ve uluslararası ticaretteki ağırlığı ile sanayileşme sürecinin ilk başladığı sektörlerden biridir (Bashimov, 2017, s.1-15).

Sektörün dünyadaki tarihine bakıldığında birçok ülkenin ekonomik kalkınmasında itici güç olduğu görülmektedir. Sanayi kültürlerini bu sayede geliştirmiş olan Japonya, Kore Cumhuriyeti, Türkiye ve Çin gibi ülkeler başta olmak üzere tekstil sanayisinde atılımlar gerçekleştirmişlerdir (Güney, 2019).

Tarihsel ve çağdaş Çin endüstrisinin önemli bir bileşeni olarak tekstillerin basılması ve boyanması önemli çevresel etkilere sahip olmuştur ve olmaya devam etmektedir. 2015 yılında tekstil endüstrisi 71,36 milyon ton standart kömür enerjisi kullanmış ve bu birçok gelişmiş ülkedeki tekstil endüstrilerinin yaklaşık iki ila üç katı bir tüketim oranını temsil etmektedir. Benzer şekilde, tekstil endüstrisi tarafından kullanılan su miktarı, gelişmiş ülkelerdeki tekstil endüstrilerinin yaklaşık iki ila üç katı civarındadır. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ile ölçüldüğü üzere tekstil atıksularına boşaltılan toplam kirletici miktarı, tüm endüstriler arasında beşinci en yüksek değerdir.

Baskı ve boyama atıksuları toplam tekstil atıksu deşarjının %80'ini oluşturmakta ve atıksu geri dönüş oranı sadece %7'dir. Ek olarak, toplam atıksu emisyonları diğerk ülkelerdeki tekstil endüstrilerinin 1,2-1,8 katıdır. Endüstride çevresel etkileri azaltmak, enerji tasarrufunu iyileştirmek, emisyonu azaltmak, atıksu arıtmanın ve daha verimli ekipmanların geliştirilmesi, çevreye daha az zararlı boyaların kullanımı dahil olmak üzere üretim sürecini optimize etmek için bir dizi çözüme yatırım yapılmıştır. Bununla birlikte, daha temiz üretim süreçleri, çevre kirliliğini diğerk üretim aşamalarına aktarma olasılığı ile sürecin yalnızca tek bir yönünü iyileştirmeye odaklandığından, kirlilik kontrolü ve temiz teknoloji çözümleriyle elde edilen çevresel iyileştirmelerin sınırlı olduğu gösterilmiştir (Zhang ve diğerkleri, 2018).

Tekstil endüstrisi, özellikle "hızlı moda" trendi, düşük fiyatlı giysi üretimine bağlı birçok kişi üzerinde çeşitli olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu, diğerk etkilerin yanı sıra, doğal kaynakların tükenmesini, katı atık ve atıksu üretimini, işçilerin sömürülmesini, zararlı kimyasalların kullanımını ve genetiğı değıştirilmiş tohumların neden olduğu ekonomik sorunları içermektedir (Piontek ve Müller, 2018).

Kuzey Amerika dergisi Textile World'e göre, kişi başına ortalama kullanıma göre, Kuzey Amerikalılar yeni tekstil ürünlerinin en büyük tüketicisi ve Avustralyalılar ikinci en büyük yeni tekstil ürünleri tüketicisidir. Her Avustralyalı yılda ortalama 27 kg yeni tekstil ürünü satın alır ve belirli bir süre sonra yardım kuruluşları veya diğerk bertaraf seçenekleri aracılığıyla 23 kg tekstil ürününü bağışlar veya elden çıkarır. Her Kuzey Amerikalı tüketicisi yılda 37 kg, her Batı Avrupalı tüketicisi ise 22 kg tekstil ürünü satın almaktadır (Moazzem, Daver, Crossin ve Wang, 2018).

Bunun yanı sıra tekstil sektöründe Türkiye, Hindistan ve Çin gibi ülkelerin yanında Almanya, İtalya, ABD gibi ülkelerin de önemli olmaya devam ettikleri bilinmektedir (Türkiye Tekstil Sektörü ve Bursa, Uludağ İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliğı, 2018).

Tekstilde endüstrileşmenin hızla yükselmesi ile tekstilin varoluşundan beri kullanılan doğal lifler ve doğal yollar ile elde edilen boyarmaddelerin kullanımı gittikçe yok olmaya başlamıştır.

Tekstil ürünlerine yönelik imalatın yoğunlaştığı günümüzde yapay veya sürdürülebilir olmayan üretim sorununa yönelik yapılan çalışmalarda insan ve çevreye zarar vermeyen materyallerin önemi anlaşılmaktadır (Kurtoğlu ve Şenol, 2004).

1960'lı yıllarda ABD'de Flower-Power düşünce hareketiyle başlayan ve doğal ürünlerin kullanımının önünü açan ve kullanılan kimyasalların eleştirel bir şekilde değerlendirilmesini sağlayan gelişme sonucunda eko tekstiller ve eko amblemliler ürünler ortaya çıkmıştır (Kurtoğlu ve Şenol, 2004).

Tekstil endüstrisi, dünyayı en çok kirleten endüstrilerden biri olarak kabul edilmektedir. Tekstil üretimi, küresel ısınma, su kıtlığı ve arazi kullanım değişiklikleri gibi konuları kapsayan çeşitli çevresel etkilere neden olmaktadır. Bu etkilerin, kişi başına düşen küresel gelir düzeylerinin artması ve “hızlı moda” olarak bilinen daha kısa giysi kullanım aşamaları tarafından yönlendirilen tekstil talebinin artması nedeniyle daha şiddetli olması beklenmektedir. Ek olarak, dünya çapında üretilen tüm tekstil ürünlerinin %73'ünden daha fazlası ya yakılmakta ya da ömürlerinin sonunda çöpe atılmaktadır. Aslında, günümüz tekstil endüstrisi çoğunlukla doğrusal bir yapıya sahiptir (al-kullan-at). Bununla birlikte, Döngüsel Ekonomi hareketi giderek daha popüler hale gelmektedir. Döngüsel Ekonomi, kaynak tüketimini azaltarak, ürünleri yeniden kullanarak ve malzemeleri geri dönüştürerek üretimin çevresel etkilerini azaltırken ekonomik değer yaratmayı taahhüt etmektedir (Braun, Som, Schmutz ve Hirsch, 2021).

“Tekstil ekolojisi” kavramı, 1970'lerin sonlarına doğru artan çevre kirliliği insan sağlığına zarar verdiği ve bu zararın ciddi boyutlara ulaşması ile birlikte ortaya çıkmıştır. Çevre dostu tekstillerin üretilmeye başlanması ile birlikte “eko tekstil” adı verilen tekstillerin tüm üretim süreçlerinin doğaya ve insana vermemesi amaçlanmıştır. Türkiye Hazır Giyim Sektörü de bu gelişmelerden yakından etkilenmiş, dünyada çeşitli önlemler alınmaya başlamış, sınırlamalarla birlikte ekolojik etiketler geliştirilmiştir (Kurtoğlu ve Şenol, 2004). Tekstil ekolojisi, tekstil üretiminde ekoloji, insan ekolojisi ve atık ekolojisini kapsamaktadır.

Tekstil ekolojisinin amacı, elyaf üretiminden giysi elde edilmesine kadar üretimin tüm aşamalarında çevreye ve insanlara zarar vermemektir. Öncelikle AB ülkelerinde gelişen

tekstillerin ekolojik farkındalığı, kitle iletişim araçlarının da etkisiyle kamuoyunun gündemine girmiştir. Bu nedenle, özellikle Avrupa ülkeleri olmak üzere, giderek daha fazla kişi ve kuruluş, tekstil ürünlerini ekolojik bir bakış açısıyla değerlendirmeye başlamaktadır. Bu eğilimler nedeniyle birçok ülkedeki tüketiciler, üretim aşamasında ve kullanım sürecinde çevreye ve insana zarar vermeyen, çevreye zarar vermeden yok edilebilen malzeme ve yöntemlerle üretilen tekstilleri kullanmaya başlamışlardır (Kurtoğlu ve Şenol, 2004).

Özellikle Almanya başta olmak üzere Avrupa ülkelerinde; tekstil ve hazır giyim sektöründe kullanılan boyalar, kimyasallar, yardımcı maddeler vb. maddelerin insan sağlığına duyarlılığının artması bu kimyasallar hakkında şüphelere yol açmıştır. Bu nedenle Almanya, kanserojen aromatik aminler içeren azo boyaların tekstil ve giyim endüstrilerinde kullanımını, ithalatını ve ihracatını yasaklamıştır. Daha sonra, 1994 yılında Türkiye Sağlık Bakanlığı'nın bir bildirisi ile boyalara kısıtlamalar getirilmiştir (Kurtoğlu ve Şenol, 2004).

Son yıllarda tekstil alanında "ekolojik tekstiller" üzerine yapılan araştırmalar sürekli olarak güçlenmiştir. İnsanların ekolojik dengeye giderek daha duyarlı hale geldiği bir ortamda, dünya çapındaki pazarlarda "ekolojik tekstil" ürünlerine olan ilgi ve talep hızla artmıştır. Eko-tekstil ürünleri insan ve çevre sağlığına zarar vermeden, ekolojik dengeyi bozmadan üretilebilir, kullanılabilir ve geri dönüştürülebilirler. Günümüzde üreticiler ve tüketiciler ekolojik ürünlere daha fazla ilgi göstermektedir. (Cebeci Tüm, 2013).

Eko-tekstil ürünleri, üstün ihracat kapasitesi ile ülke ekonomisinde ekolojik dengenin sağlanması, tarım alanlarının geliştirilmesi, kullanıcı sağlığının ve çevrenin korunması, kurumsal imajın geliştirilmesi ve sosyal sorumluluklar yaratılmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. Çevre dostu ve ekolojik tekstil ürünleri üretimi için önemli koşullardan biri de doğal kaynakların etkin kullanımınıdır (Özdemir ve Tekoğlu, 2012).

2.2. Tekstilde Sürdürülebilirlik Kavramı

Sürdürülebilirlik kavramı ortaya çıktığı günden bu yana birçok kurum ve kuruluş tarafından farklı şekillerde tanımlanmıştır. "Sürdürülebilirlik" terimi ilk olarak 1712 yılında Alman bilim adamı Hans Carl von Carlowitz tarafından "Sylvicultura O Economica" adlı kitabında kullanılmıştır.

1970'lerde yaşanan enerji kriziyle birlikte uluslararası alanda yeni enerji ve yenilenebilir enerji ortaya çıkmaya başlamıştır. Birleşmiş Milletler tarafından 1987 yılında yayınlanan Brundtland Raporu, "sürdürülebilir kalkınma" kavramını resmen ortaya koymuştur. 1992 yılında, Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı öncülüğünde, kalkınmanın sosyo-ekonomik ve çevresel boyutlarını değerlendirmek üzere Rio Konferansı toplanmıştır. Toplantı sonunda alınan karar, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) adlı uluslararası bir anlaşmaya imza atmışlardır. Daha sonra 1997 yılında Kyoto'da sanayileşmiş ülkelerin sera gazı emisyon limitlerini uyguladıkları bir protokol imzalanmıştır (Gönel, 1990; Kyoto Protokolü. Birleşmiş Milletler, 1998; Leblebici, 2008).

Bu dönemde çevre kirliliği ciddi boyutlara ulaşmış, tekstil sektörü ve diğer sektörler de etkilenmiştir. Tekstil endüstrisinin doğrudan çevresel etkisi, alıcı ortama kimyasal içeren atık suların deşarjı, enerji tüketimi, hava emisyonları, katı atık, gürültü ve kokulardan kaynaklanmaktadır (Taşkın ve Güney, 2014).

Özellikle 1973 ve 1979 enerji krizlerinden sonra doğal kaynakların rastgele tüketilmemesi gerektiği önceden bilinmesine rağmen, sınırlı enerji kaynaklarının verimli kullanımı, yeni enerji kaynakları arayışı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı uluslararası tartışmalarda sıklıkla tartışılmıştır. Brundtland Raporu'nda "Sürdürülebilir kalkınma" kavramı resmiyet kazanmıştır. Bu raporu, 1992 yılında gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı başkanlığında, bugün ve gelecekte üstlenilen birçok projenin temelini oluşturan Rio Konferansı izlemiştir.

Rio bildirisinde şu dört soru ele alınmıştır:

1. Ekonomik ve sosyal yönler
2. Kalkınma için kaynakların korunması ve yönetimi

3. Kilit paydaş gruplarının rolünün güçlendirilmesi
4. Uygulamaların nasıl uygulandığı ve teşvik edildiği bu konudaki kaynakları harekete nasıl geçireceği

Rio Konferansı'nda alınan kararlar daha sonra Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) olarak bilinen uluslararası bir anlaşma şeklinde imzalanmıştır (Gönel, 1990; Lelebici, 2008). Sürdürülebilirlik konusunda bir sonraki önemli adım, Aralık 1997'de Kyoto'da düzenlenen UNFCCC 3. Taraflar Konferansı'nda atılmıştır. İmzalanan protokol uyarınca, sera gazı emisyonlarını sınırlamak için taraflara endüstriyel su olma konusunda bağlayıcı yükümlülükler getirilmiştir. 16 Şubat 2005'te yürürlüğe giren Kyoto Protokolü'ne Mayıs 2010'da 191 ülke ve Avrupa Birliği (AB) taraf olmuştur (Kyoto Protokolü. Birleşmiş Milletler, 1998).

Ülkemizde 1996-2000 yıllarını kapsayan Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, doğal kaynakların yönetimini ve sürdürülebilirliğini kapsayan ilk plandır. Türkiye UNFCCC'ye 2 Mayıs 2004 tarihinde katılmıştır. 26 Ağustos 2009 tarihinde Kyoto Protokolü'ne taraf olmuştur. Türkiye, özel konumu nedeniyle listede yer almamıştır bu sebeple 2008-2012 yılları arasında herhangi bir yükümlülüğü olmamıştır (Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı 1995, <http://cevremuhendisligi.org/index.php/cevre-aktuel/cevre-hukuku/312--turkiye-ve-kyoto-protokolu>, 2020).

Birleşmiş Milletler Konferansı'nda alınan kararların uygulanmasının değerlendirilmesi amacıyla 26 Ağustos-Eylül 2002 tarihleri arasında Güney Afrika'nın Johannesburg kentinde düzenlenen Dünya Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi, 1992 yılında Rio'da düzenlenen Uluslararası Çevre ve Kalkınma Örgütü ve özel stratejiler geliştirilmiştir. Bu zirvede Türkiye'nin sosyal, ekonomik ve çevresel durumunu ele alan ülke raporu sunulmuştur. (Lelebici, 2008).

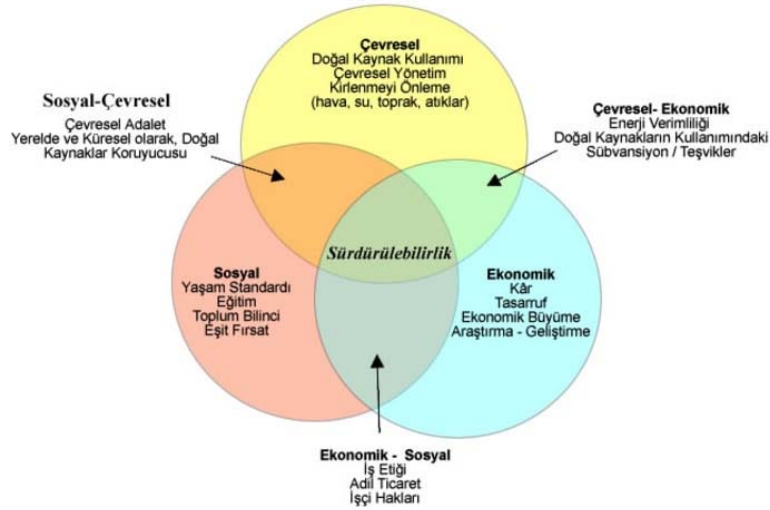
Raporda sürdürülebilirlik farklı şekillerde tanımlanmaktadır. Brundtland raporunda sürdürülebilir kalkınma; "bugünün ihtiyaçlarının gelecek nesillerin ihtiyaçlarını sınırlamadan karşılanması süreci" olarak yorumlanmaktadır (Aksu, 2011, s.14).

Sürdürülebilir kalkınmanın kabul edilen üç boyutu bulunmaktadır: Ekonomik, çevresel ve sosyal (Harris, 2000).

Ekonomi; tarımsal ve endüstriyel üretim, hizmet üretimi, devlet ekonomisinin devamlılığını ifade etmektedir.

Çevre; yenilenebilir kaynakları kullanarak doğayı korumayı ifade etmektedir.

Sosyal; eşitlik, sağlık, eğitim gibi çeşitli sosyal hizmetleri ifade etmektedir (Şekil 2.1) (Harris, 2000).



Şekil 2.1. Sürdürülebilirlik kavramı (Harris, 2000)

Sürdürülebilirlik ve değerlendirmesi endüstriler, hükümetler ve hatta müşteriler için son derece kritiktir. Her endüstriyel sektör, şirket, birey ve hatta hükümetler ve farklı ulusların sürdürülebilirlik hedefleri ve taahhütleri vardır. Yukarıda belirtilen tüm bu oyuncuların sürdürülebilirlik başarı düzeyini ölçmek kaçınılmazdır ve bunun için sürdürülebilirliği değerlendirmek için bir araç son derece önemlidir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, sürdürülebilirlik çevresel, ekonomik ve sosyal yönler olmak üzere üç ana öğeye odaklanır ve herhangi bir değerlendirme tekniğinin bu üçlü düşünceye odaklanması gerekir. Sürdürülebilirlik bir ürün / süreç, proje ve ayrıca bir sektör ve bir ülke için değerlendirilebilir. Değerlendirme araçları çeşitli şekillerde

sınıflandırılır. Çeşitli yazarlar bu araçları cetvel / ölçek / yöntemle göre çeşitli şekillerde sınıflandırmışlardır. Tüm araçlar tekstil ve giyim tedarik zinciri için kullanılamaz ve bazı araçlar tekstil ürünlerinin sürdürülebilirliğini değerlendirmek için oldukça belirgindir.

Tekstil ürünlerinin 2030 yılına kadar yeryüzünde daha iyi bir yaşam için önemli bir rol oynayacağına inanılmaktadır. Geleceğin tekstil sektörü için sürdürülebilirliği ve malzemelerin geri dönüşümü, üretim süreçleri ve iş modelleri ile öne çıkmaktadır.

Bu kapsamda tekstil ve hazır giyim sektöründe öne çıkan uygulamalar temiz üretim, ekolojik etiketler, enerji verimliliği, dögüsel ekonomi ve yaşam döngüsü analizi çalışmalarıdır. Dünya sektöründe rol alan birçok firma sürdürülebilirlik çalışmalarının bilinciyle, tüketici ihtiyaçlarını karşılamaktadır.

2.3. Poliesterin Boyanması

Boyama işlemi, esas olarak tekstil malzemelerine uygulanan kimyasal bir işlemdir. Başarılı bir kimyasal işlem için renklendirici ve yardımcı kimyasalların yapısını, tekstil malzemelerinin kimyasal özelliklerini ve işlemde meydana gelen kimyasal veya fizikokimyasal mekanizmaları anlamak çok gereklidir. Konveksiyon yönteminde işlem, çözücü olarak çok miktarda su kullanan bir ortamda gerçekleşir. Boyama sonunda bir kg tekstil materyali için 40 ila 300 litre atık su oluşmaktadır (Rott, 2003).

Ortaya çıkan atıksu, yılda üretilen toplam 2 ila 20 milyar m³ atıksuya eşdeğerdir ve bu da ciddi çevre sorunlarının olduğunu göstermektedir. Tuz ve alkali dispersanlar gibi kimyasallar atık su oluşumuna neden olabilse de en büyük çevre sorununa neden olan kirleticiler boyalardır. Sentetik boyaların kimyasal yapısı, ışık, su ve bazı kimyasalların neden olduğu bozulmaya direnecek şekilde tasarlanmıştır (Zollinger, 1987).

Bu nedenle, su arıtma tesisinin prosesi, boya içeren atık suyu ayrıştıramaz ve nihayetinde temizleyememektedir.

İnsanlık tarihi boyunca ne sanatın ortaya çıkışını ne de resim tarihinin başlangıcını tam olarak tahmin edememekteyiz. Yıllar geçtikçe insanlar çeşitli bitki, hayvan ve

minerallerden doğal boyalar elde etmişlerdir. Doğal boyalar, eski zamanlardan beri yün, ipek, deri ve pamuk gibi çeşitli doğal lifleri boyamak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Boyama için boya bitkilerini kullanılmasının 4000 yıl öncesine kadar izlenebildiği söylenmektedir. Ancak sanayileşme sonrası sentetik boyaların bulunmasıyla birlikte kullanılan boya bitkilerinin miktarı yok olma noktasına kadar düşmüştür.

1980'li yıllarda birçok sentetik boyanın toksik, kanserojen ve çevre kirliliğine neden olduğunun belirlenmesiyle doğal boyama önemli hale gelmiştir. Bu nedenle sürdürülebilir kalkınma kavramı hayatımıza girmiştir (Sunerli ve Aydın, 2019).

Kullanılan doğal boyalar çevre kirliliğine neden olmamakta, toksik ve kanserojen değildir, doğal antibakteriyel özelliklere sahiptir (Turkish Cultural Foundation 2021). Artan çevre bilinci, sentetik boyaların neden olduğu çevre kirliliği, insan sağlığını tehdit eden toksik etkiler ve atık sorunları nedeniyle çevreciler sentetik boyaların kullanımına her zaman karşı çıkmışlardır. Sentetik boyaların farkındalığının artmasıyla birlikte insanlar yenilenebilir, çevre kirliliğini minimuma indiren ve genel olarak insan sağlığına zararsız doğal boyaların kullanımına giderek daha fazla ilgi duymaktadır (Sunerli ve Aydın, 2019).

Boyama endüstrisinde 10.000'den fazla farklı boya ve pigmentin kullanıldığı ve her yıl dünya çapında 0,7 milyon ton sentetik boya üretildiği tahmin edilmektedir (Ogugbue ve Sawidis, 2011).

Bu nedenle fabrika atıkları da oldukça fazladır ve çevreye büyük zararlar vermektedirler. Özellikle temiz su kaynakları büyük zarar görmektedir.

Son yıllarda insan sağlığı anlayışındaki değişiklikler ve çevre kirliliği nedeniyle bu konulara daha duyarlı hale gelmişlerdir. Bu nedenle insan sağlığına toksik etkisi olmayan çevre dostu ürünlere ilginin arttığı gözlemlenmektedir. Hazır giyim sektörü doğanın düşmanı olarak görüldüğü için günümüzde çevre örgütleri çeşitli önlemler almaya çalışmaktadır. Özellikle tekstil ve deri boyama tesisleri büyük miktarlarda temiz su

kullanmakta ve kimyasal madde içeren atıkları çevreye vererek küresel ısınmaya ve biyolojik yok oluşa neden olmaktadır (Sunerli ve Aydın, 2019).

Poliester elyaf, Türkiye’de ve hatta dünyada en yaygın kullanılan sentetik elyaftır. Poliester elyafın kısaltması; PES veya polietilen tereftalat bazlı PET'tir. Polietilen tereftalat bazlı poliester, DMT veya TPA ve etilen glikol veya nadiren etilen oksit veya etilen karbonat kullanılarak üretilmektedir (Balcı, 2011, s.42-49).

Sentetik liflere ve bunların karışımlarına bakıldığında en geniş kullanım alanına sahip lifin poliester olduğu söylenebilir. Bu nedenle poliester liflerinin geliştirilmesinde birçok çalışmaya rastlanabilir. Terbiye işlemi düşünüldüğünde, bu çalışmalar esas olarak elyafın boyanabilirliği ile ilgilidir. Poliester elyaf, sentetik elyafın özelliklerine sahip olduğundan, boyalarla kimyasal olarak bağlanan serbest uçları yoktur. Bu nedenle selüloz lifleri gibi reaksiyonlar kimyasal reaksiyonlara girememektedir.

İnsanlığın yaklaşık %60'ında etkili olan iklim koşullarındaki değişikliklerin ciddi kuraklıklara ve su kıtlığına yol açabileceği düşünüldüğünde, su kaynaklarının sürdürülebilirliğinin gelecek için çok önemli olduğu görülmektedir (Odabaşoğlu, Avinç ve Yavaş, 2013).

Tekstil sektörünün suyu en çok tüketen sanayilerden biri olduğu bilinmektedir. Konvansiyonel tekstil boyamada hem temiz su alımı hem de atıksuların bertarafı açısından büyük miktarlarda su kullanılmaktadır. Ortalama olarak, 1 kg tekstil malzemesini işlemek için yaklaşık 100-150 litre suya ihtiyaç vardır ve yılda yaklaşık 28 milyar kg tekstil boyanmaktadır. Basit bir hesapla tekstil üretimi için boyamacılıkta kullanılan yıllık su miktarı Akdeniz’deki su miktarının yarısına eşittir.

Su, yıkama, tarama, beyazlatma ve boyama gibi birçok ön işlem ve bitirme işleminde çözücü olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, proses suyunun ve kimyasalların ortadan kaldırılması tekstil boyama endüstrisi için gerçek bir atılım olacağı düşünülmektedir (“Water and chemical free”, 2019).

Boyalar genellikle iki ana bileşenden oluşan küçük moleküllerdir; renk üreten bir kromofor ve boyayı ipliğe bağlayan fonksiyonel bir grup. Literatürde kimyasal yapılarına

veya kullanılan iplik cinsine göre sınıflandırılan yüzlerce boya bulunmaktadır. İplik üzerine adsorbe edilen boya miktarı tekstil ipliğinin ve boyanın cinsine göre değişmektedir. Adsorpsiyon derecesi de zaman, sıcaklık, pH ve yardımcı kimyasallar gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir (Kocaer ve Alkan, 2002).

Boyaların sınıflandırılmasında dikkat edilmesi gereken sorun boyanın kromoforu ve fonksiyonel grubudur. Fonksiyonel gruplar boyanın elyafa tutunmasını sağlasa da bazen fiziksel bazen kimyasal etkileşim yoluyla bazen de proste eklenen kimyasal maddelerle indirgenebilmekte bazen de metal içeren boyar maddeler ile metal kompleksleri oluşturabilmektedir. Elyaf kombinasyon boyayı elyaf üzerine sabitleirken, boyanın kimyasal ve fiziksel özelliklerini ve elyafın tipini ve kimyasal yapısını ayrı ayrı düşünmek mümkün değildir. Bu nedenle, boyama işlemi sırasında hemen hemen her türlü kimyasal bağ oluşmaktadır (Serindağ ve Halefoğlu, 2000).

Boyaların renkli doymamış organik moleküller olarak etkin bir şekilde kullanılabilmesi için liflerle etkileşime girmeleri gerekmektedir. Bu etkileşimler,

- Dispersiyon (Van der Waals) Kuvvetleri,
- Kovalent Bağ,
- Elektrostatik bağlar
 - İyonik Bağ,
 - Koordine Kovalent Bağ,
- Hidrojen Köprüleri

Bütün kuvvetlerde ortak olan nokta, bunların çekim etkisinin elektron hareketliliği ve dağılım durumuna dayanmasıdır.

Van der duvar kuvveti, kalıcı ve geçici dipol momentlerinin ve evrensel yerçekiminin neden olduğu etkileşimdir.

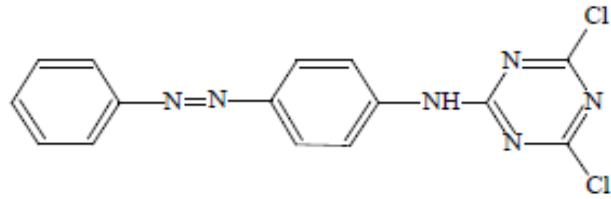
Hidrojen bağı, gücü ve yüksek derecede yönlülüğü nedeniyle, supramoleküler yapı tasarımında en önemli kovalent olmayan etkileşim türüdür.

Kovalent bağ, metalik olmayan iki atom arasında bağ elektronlarının paylaşılmasıyla kovalent bağ oluşmaktadır. Bir örnek, reaktif boyaların selüloz ve protein lifleriyle kombinasyonu verilebilir.

İyonik bağ, tuz bağı olarak da bilinen iyonik etkileşim yoluyla sağlanır. Amfoterik liflerin (yün gibi) anyonik veya katyonik gruplar oluşturan boyalarla etkileşimi böyle bir örnek teşkil edebilir.

Koordineli kovalent bağ, elektron eksikliği olan bir merkeze bir elektron çifti sağlanmasıyla oluşan bağıdır. Koordineli kovalent bağlara bir örnek, boya molekülündeki metal için elektronik bağ çiftleri sağlayan mordan boyaların ve fibere bağlanırken fiberdeki elektron veren grup (-NH₂ gibi) kombinasyonudur. (Serindağ ve Halefoğlu, 2000).

Poliester boyamacılığında en yaygın kullanılan boyarmadde grubu dispers boyarmaddeler olup, bunun dışında küp ve açık renklere pigment boyalarıyla da çalışılabilmektedir. PES liflerinin boyanmasında en çok kullanılan dispersiyon boyarmaddeleri suda çözünmediklerinden, boyama bunların sulu dispersiyonları ile yapılmaktadır. Dispersiyon boyarmaddeleri genelde azo ve antokinon olmak üzere 2 farklı yapıda olabilmektedir (Yurdakul ve Atav, 2006).



Şekil 2.2. Reaktif bir dispers boyasının yapısı (Fernández, 2005)

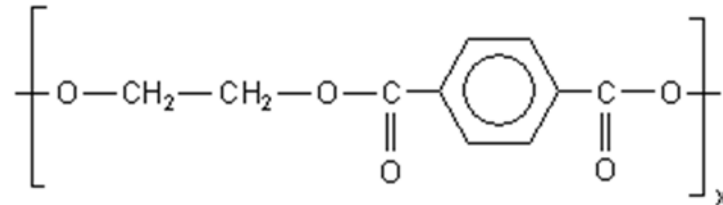
Dispers boyalar, düşük moleküler ağırlıklı, düşük suda çözünürlüğe, amino ve hidroksil gruplarına sahip bileşiklerdir. Dispersiyon yoluyla sentetik elyaf polimerine aktarılırlar. Poliester lifi yüksek kristallığe ve benzersiz hidrofobikliğe sahip olduğundan, makromoleküler boyaların lifin içine girmesi kolay değildir.

Bu nedenle boyama işlemi uzun zaman almaktadır. Bazen uygulamalar yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gerektirmektedir. Lif içine difüzyon çok yavaştır dolayısıyla bu koşullar altında boyama hızlı gerçekleşmemektedir çünkü dengeye ulaşmak çok uzun zaman almaktadır. Normal basınç altında çalışan ve maksimum 100°C'ye kadar ısıtılan ekipmanlarda, poliester sadece yüksek difüzyona sahip küçük molekülü dispers boyalar kullanılarak açık ve orta renklerde boyanabilir. Orta yoğunlukta boyama gerektiğinde genellikle %2-5 oranında dispers boyalar kullanılmaktadır. Bazı dispers boyalar, ısıyla sabitleme koşulları altında kararsızdır (Aydoğdu, 2012).

Mevcut tekstil proseslerinde, boyama ve yıkama prosedürleri olarak büyük miktarlarda su gerekir ve poliester elyafının su banyosunda boyanması da suda dispers boya çözünürlüğünü iyileştirmek için dispersiyon ajanları ve yüzey aktif maddeler gerektirmektedir. Bu nedenle, poliester liflerin geleneksel boyama işlemi, çeşitli dispersiyon maddeleri, yüzey aktif maddeler ve kullanılmayan boya ile kirlenmiş olan atıksuyun çoğunu tahliye etmektedir. Çevre dostu süperkritik sıvı boyama prosesinin bu kirlilik problemlerinin üstesinden geldiği düşünülmektedir (Özcan ve Özcan, 2005).

2.3.1. Poliester elyafının kimyasal yapısı ve özellikleri

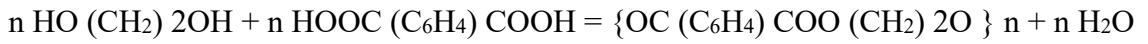
Poliester, 1941 yılında Whinfield ve Dickson tarafından elde edilmiştir. Yapısında (-C) grubu içeren polimer maddelerdir.



Sekil 2.3. Poliester elyafının kimyasal yapısı (Seventekin, 2011)

Günümüzde polietilen tereftalat (PET) bazlı poliesterler, dimetil tereftalat veya tereftalik asidin etilen glikol veya etilen oksit monomerleri ile polikondenzasyonunun sonucudur. (Seventekin, 2011).

Poliester olarak da bilinen PET (polietilen tereftalat); etilen glikol (1,2-etilen glikol) ve tereftalik asidin (1,4-ftalik asit) yoğunlaşması ile oluşur. Yoğunlaşma reaksiyon formülü aşağıdaki gibidir.



Poliester lifi, doğada bulunmayan polimerlerin sentezlenmesiyle oluşur ve suni liflerin örneklerinden biridir. Poliesterin birçok farklı türü vardır. Hepsi yoğunlaşma reaksiyonları ile üretilmektedir (Özcan, 2019). Poliester, dünyada en yaygın kullanılan sentetik elyaf ve klasik tekstillerden teknik ve özel tekstil yapılarına kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir (Militky, 2009).

Kimyasal olarak poliester, esas olarak ester fonksiyonel gruplarındaki bileşiklerden oluşan bir polimerdir. Poliesterler, bir polimer sınıfıdır veya daha spesifik olarak, ana bağlarında ester fonksiyonel grupları içeren yoğunlaşma polimerleridir.

Poliesterler doğada bulunsada, genellikle tüm polietilen tereftalat ve polikarbonatı içeren büyük bir sentetik poliester grubuna atıfta bulunmaktadırlar (De Giorgi, Cadoni, Maricca ve Piras, 2000).

Poliester elyaf; ana zincirinde ester fonksiyonel grupları (-C) içeren bir polimer türüdür. Birçok poliester grubu olmasına rağmen, endüstri terimi poliester, poli(etilen tereftalat) (PET) ve poli(bütillen tereftalat) (PBT) anlamında gelmektedir (Özcan, 2019).

Poliester lifleri tüm kimyasal lifler arasında lider konumdadır. Bu liflerin benzersiz özellikleri, makromoleküler zincirlerde alifatik ve aromatik parçaların bulunması ve düzenli moleküler yapılarından kaynaklanmaktadır. Poliester, sadece iyi son kullanım özellikleri ve üretim ekonomisi nedeniyle değil, özellikle fiziksel ve kimyasal modifikasyon kolaylığı, negatifleri bastırması ve pozitif özellikleri artırması nedeniyle elyaf üretiminde kullanılan baskın liflerdendir (Militky, 2009).

Poliester elyafın fiziksel ve kimyasal özellikleri, boyama işlemi sırasında olumlu veya olumsuz bazı etkilere sahip olmaktadır. Bunlar;

- Yüksek elastikiyet ve yüksek mukavemet,
- Yüksek aşınma direnci,
- Mükemmel ısı direnci,
- Düşük su emme, yıkanması kolay, çabuk kuruyan,
- Mükemmel ışık direnci ve hava koşullarına dayanıklılık, iyi elektrik yalıtımı,
- Çok sayıda aşındırıcı kimyasala, özellikle asitlere karşı yüksek direnç (Seventekin, 2011).

2.3.2. Poliesterin sulu ortamda boyanması

Poliester elyafın sıkı kristal yapısı nedeniyle makromoleküler boyaların nüfuz etmesi kolay değildir. Liflere elektrostatik çekim veya kovalent bağlarla bağlanan boyalar hidrofobik yapısı nedeniyle fonksiyonel grupları olmadığı için hidrofilik boyalar için uygun değildir. Poliester lifler tipik olarak çok kompakt bir yapıya ve yüksek kristalliğe sahip olduğundan, bunlar için boya seçimi dispers boya aralığı ile sınırlıdır.

Geleneksel yöntemlere göre poliester lifleri üzerinde dispers boyalar olarak uygulanan bir dizi tiadiazolil azo boyasının haslık özellikleri, daha önce kantitatif yapı-aktivite ilişkilerini kurmayı amaçlayan bir kemometrik yaklaşım kullanılarak araştırılmıştır (Rita De Giorgi ve diğerleri, 2000). Poliester liflerin boyanması zordur. Genel olarak, bu zorluklar aşağıdaki faktörlerden kaynaklanmaktadır:

- Poliester elyafın yüksek kristalliği nedeniyle, kristal alanı yüksektir ve boyanın yayılmasını sağlayan az sayıda amorf alan vardır.
- Hidrofobikliği yüksek olduğundan yapısında hidrofilik grup yoktur. Yüksek hidrofobikliği nedeniyle nem emme oranı çok düşük sadece %0,4'tür.
- Poliester liflerin yapısında boyalarla kimyasal bağ oluşturabilecek fonksiyonel gruplar yoktur.

PES liflerinin iyi ve kolay bir şekilde boyanabilmesi uygun boyarmadde kullanımı ve sıkı lif yapısının gevşetilmesi ile mümkün olmaktadır. Bunun için yani lif yapısının gevşetilmesinde;

- Küçük moleküllü boyarmaddelerin kullanılması
- Yüksek sıcaklıklarda çalışılması (HT, termosol)
- Carrier adı verilen hızlandırıcıların kullanılması gibi imkanlar söz konusudur. Sözü edilen yöntemlerin dışında, PES liflerinin boyanmasında plazma ile ön işlem, lazer ışınları ile lif yüzeyinin modifikasyonu, süperkritik karbondioksit (CO₂) ortamında boyama, mikrodalga ile boyama gibi daha yeni yöntemler üzerinde çalışmalar da yapılmaktadır (Yurdakul ve Atav, 2006).

Poliesterin renklendirmesi esas olarak çok küçük parçacık boyutları ve iyonik olmayan doğası nedeniyle dispers boyaları kullanılarak gerçekleştirilir, bu da boya seçimini dispers boya aralığı ile sınırlı kılmaktadır. Buna ek olarak, son zamanlarda çevresel kaygıların artan küresel farkındalığı nedeniyle PET ve diğer sentetik liflerin doğal boyalarla renklendirilmesinde hem akademiye hem de tekstil endüstrisine yeni bir ilgi olduğu görülmektedir. Kına, madder, safran, kola somunu, soğan ve kurkumin gibi çeşitli alternatif doğal ürünler çevre dostu renklendirici olarak kullanılmıştır.

Bununla birlikte, bu doğal renklendiricilerin geleneksel yöntemler kullanılarak sentetik lifler üzerine uygulanması genellikle bir ön işlem (yüzey ön-aktivasyon) ve farklı türde kimyasallar gerektirmektedir.

Bu prosedür, mevcut süreci daha az ekonomik hale getirir ve doğal boyaların çevresel olasılığını engeller. Bu bağlamda, bu doğal boyaların ek ön işlem ve yardımcı kimyasallar olmadan sentetik liflere uygulanması için uygun bilimsel teknik ve yöntemlerin geliştirilmesine şiddetle ihtiyaç duyulmaktadır ve çevre dostu renklendirme ve potansiyel ticarileştirme için önemli bir adımdır (Abate ,Ferri, Guan, Chen ve Nierstras, 2019).

2.3.3. Poliesterin süperkritik CO₂ ortamında boyanması

Tekstil sektörü, işletmelerde en çok su kullanan sektörlerden biridir. 1 kg tekstil malzemesini işlemek için 100 litre su kullanılması gerektiği tahmin edilmektedir. Su,

yıkama, sürtünmeli temizleme, ağartma, boyama gibi ön işlemlerde ve ayrıca su geçirmezlik ve anti-pilling gibi apre işlemlerinde çözücü olarak kullanılmaktadır. Tabii ki, su kalitesi, büyük miktarlarda su kullanma sürecinde en önemli parametrelerden biridir. Kullanılan suyun kalitesi sürekli değişmektedir ve bu da ürünün kalitesini etkilemektedir. Fazla su kullanımının yanı sıra gerekli su temini ve yüksek ön arıtma maliyetleri de artan sorunlardan biridir.

Tekstil ürünlerinin boyama sırasında suyun yerine süperkritik karbondioksitin kullanılarak boyama yapılabilmesi tekstil sektörü açısından çok büyük ve çok önemli bir adımdır. Bir süper kritik akışkanın yoğunluğu, bir sıvının yoğunluğu ile kabaca aynıdır, ancak bir gazın yoğunluğundan 200 ila 400 kat daha fazladır.

Bu özelliklerinden dolayı süper kritik akışkan, makromolekülleri ve uçucu olmayan molekülleri çözme konusunda çok iyi bir yeteneğe sahiptir. Ayrıca süper kritik akışkanlar düşük viskoziteleri ve yüksek difüzyon katsayıları nedeniyle sıvı çözücülere göre daha yüksek kütle transfer performansına sahiptirler. Süper kritik akışkanların viskozitesinin sıvılara göre 10 kat daha düşük olduğu ve bunda çözünen moleküllerin 10 kat daha büyük olduğu söylenmektedir.

Bazı süper kritik akışkanların kritik sıcaklık ve kritik basınç değerleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Süperkritik durumda kullanılacak farklı sıvılar olmasına rağmen en çok kullanılan karbondioksittir. (Odabaşoğlu ve diğerleri, 2013). Karbondioksit 72,9 Atm basınç ve 31,3°C sıcaklıkta kritik değerlerini alarak süperkritik akışkan haline dönüşmektedir. Poliester lifinin süperkritik ortamda boyama koşulları ise 585 kg/m³ CO₂ yoğunluğunda 30 MPa, 250 bar ve 120° C'dir (Yiğit, Eren ve Eren, 2019).

Nitrik oksit ve triflorometanın kaynama noktalarının ve kritik noktalarının karbondioksitinkine yakın olduğu görülebilmektedir (Çizelge 2.1). Ancak karbondioksit; yanmaz, aşındırıcı ve patlayıcı değildir, çevre dostu, geri dönüştürülebilir, ucuz, kolay temin edilebilir, kimyasal olarak inert ve toksik değildir; daha düşük kritik sıcaklığa ve kritik öneme sahip olduğundan tekstil uygulamaları için en iyi seçim olduğu düşünülmektedir. Bu özelliklere ek olarak, karbondioksit, bitkiler tarafından fotosentez

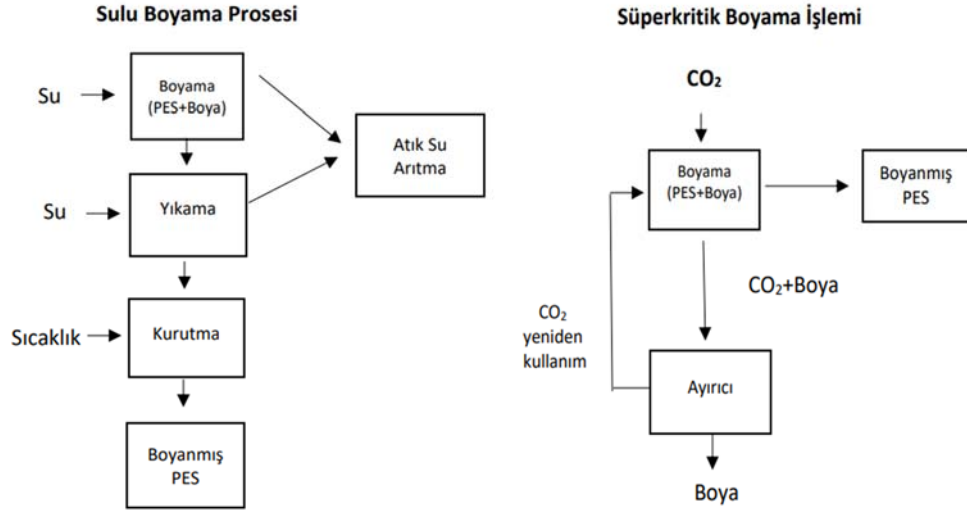
sırasında besin üretmek için kullanıldığı için biyolojik olarak parçalanabilmektedir (Odabaşoğlu ve diğerleri, 2013).

Çizelge 2.1. Bazı süperkritik akışkanların kritik değerleri (Odabaşoğlu ve diğerleri, 2013).

Akışkan	Kritik Sıcaklık (°C)	Kritik Basınç (atm)
Su	374,4	226,8
Amonyak	132,5	112,5
Dietileter	193,6	36,3
n-Bütan	152,0	37,5
n-Propan	96,8	42
Karbondioksit	31,3	72,9
Etan	32,2	48,8
Etonal	243,4	63
Klortriflor metan	28,8	39
Diazotmonoksit	35,6	71.7

Su yerine boya çözücü olarak süperkritik karbondioksit (scCO₂) kullanan tekstillerin boyanması, son yirmi yılda su kullanımını ve su kirliliğini ortadan kaldırmak için alternatif bir süreç olarak geliştirilmiştir. Çevre ve güvenlik açısından bakıldığında, süperkritik karbondioksit tekstil boyamada suyun yerini almak için en iyi çözücüdür.

Ucuz, toksik olmayan, yanıcı olmayan, çevre dostu ve birçok koşulda kimyasal olarak atıldır. Alternatif süperkritik boyamanın ve mevcut işlemin basit akış şemaları Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Fernandez, 2005).



Şekil 2.4. Sulu prosesi ve susuz (süperkritik) prosenin işlem akışı (Fernandez 2005’den değiştirilerek alınmıştır)

Süperkritik boyama prosesi 4 adımda gerçekleşmektedir. İlk adım olarak boyarmadde süperkritik karbondioksitte çözünmektedir. İkinci adım boyarmaddenin life transfer edilmesidir. Üçüncü adım boyarmaddenin lif tarafından absorbe edilmesidir. Son olarak da life difüzyon edilmesi ile dördüncü adımda tamamlanmaktadır.

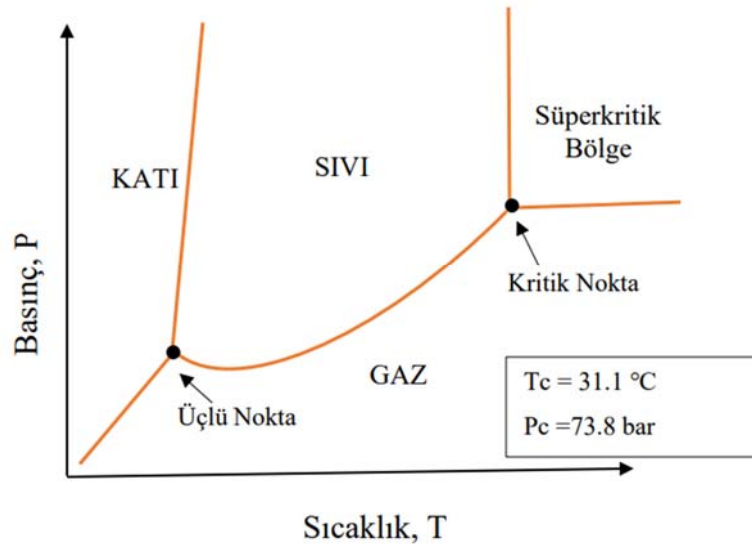
Süperkritik boyama prosesinde boyarmaddenin çözünmesi için sıkıştırılmış karbondioksit bulunmaktadır. Boyamanın gerçekleştiği kaplar 300 bar basınçlara ve 150°C sıcaklığa dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Süperkritik boyama makinaları yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlara dayanabilecek şekilde tasarlandığı için çalışma sırasında teknik sorunlara yol açmamaktadır. Boyama işlemini 3 adımda gerçekleştirebilmektedir. Tartılan tekstil materyalleri ve boyarmadde boyamanın yapılacağı kazana konulmaktadır. Daha sonra karbondioksit tankından karbondioksit pompasına karbondioksit alınarak pompa doldurulmaktadır. Pompa sisteminde karbondioksit istenilen basınçta sıkıştırılmaktadır ve sonrasında boya tankına gönderilmektedir.

Boya tankı istenilen sıcaklığa kadar ısıtılır ardından sıcaklık ve basınç gaz hacminde artışa neden olmaktadır. Boyama sıcaklığına gelindiğinde boyarmadde tank içinde çözülmeye başlar ve lif içerisinde çözelti sirküle olmaya başlamaktadır. Boyama işleminden sonra sıcaklık düşürülerek basınç boşaltılır ve çözünemeyen boyarmadde

genelde olmamakla birlikte olursa da basınç boşaldıktan sonra katı bir şekilde ortamdan alınabilmektedir. Boyama bitiminde basınçta uzaklaştırıldıktan sonra kumaş boyama tankından alınır (Özcan, 2019).

2.4. Süperkritik CO₂'in Özellikleri ve Kullanım Alanları

Maddelerin faz diyagramı Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, katı, sıvı ve gaz olarak tabakalandırılmıştır. Üçlü noktada her üç faz da bir arada bulunmaktadır. Eğriler maddenin, iki faz arasında bulunduğunu göstermektedir. Gaz-sıvı fazın bir arada bulunduğu eğriden daha yukarıya hareket edilirse hem basıncın hem de sıcaklığın arttığı; buhar basıncına karşılık gelen sıcaklık noktası bulunmaktadır. Sıvı, termal genişmeden dolayı daha az bir yoğunluğa sahip olur ve gazda, basınç artışına bağlı olarak daha yüksek yoğunluğa sahip olmaktadır. Sonuç olarak, her iki fazın yoğunlukları aynı olur, gaz ve sıvı arasındaki fark ortadan kalkar ve eğri kritik noktada bir sona gelmektedir. Yani kritik noktada her iki fazın yoğunluktan gaz ve sıvı durumun ortadan kalkması nedeniyle aynı olmakta ve gaz ile sıvı fazdan farklı olmaktadır. Madde bu noktadan itibaren akışkan olarak tanımlanmaktadır. Kritik nokta, faz diyagramında belli bir basınca ve sıcaklığa sahiptir, kritik sıcaklık T_c , kritik basınç ise P_c olarak gösterilmektedir (Devrent, Özcan ve Durur, 2006).



Şekil 2.5. Süperkritik CO₂'nin şematik basınç-sıcaklık diyagramı (Yiğit ve diğerleri 2019'dan değiştirilerek alınmıştır)

Sıcaklık ve basınç arttıkça, karbondioksitin sıvı ve gaz fazları, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi süper kritik bir sıvı fazına dönüşmektedir. Süper kritik karbon dioksit, genişleyen bir sıvı veya büyük ölçüde sıkıştırılmış bir gaz olarak düşünülebilir. Kısacası karbondioksit kritik noktanın üzerinde hem sıvı hem de gaz özelliklerine sahiptir. Hazne iki fazlı karbon dioksit (sıvı ve gaz) içermektedir. Sıcaklık ve basınç arttıkça, iki faz birleşir ve süper kritik bir akışkan fazına dönüşmektedir. (“Water and chemical free”, 2019).

Süperkritik durumdaki bir akışkanda, sıkıştırılmış bir madde kabı doldurur ve kabın şeklini alarak gaz gibi davranış gösterir. Kabının altını kaplayan sıkıştırılmaz bir akışkan sıvı gibi davranmaz. Öte yandan, bir süperkritik akışkanın karakteristik çözme gücü, tipik bir sıvı yoğunluğuna sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Maddenin yeni halinde olduğu için sıvı veya gaz olarak görülememesinin nedeni budur. Şekil 2.5 (şematik basınç-sıcaklık diyagramı) safliktaki maddeler için ideal basınç sıcaklığını göstermektedir (Saus, Knittel ve Schollmeyer, 1993; Banchoero, 2013, s. 2-17).

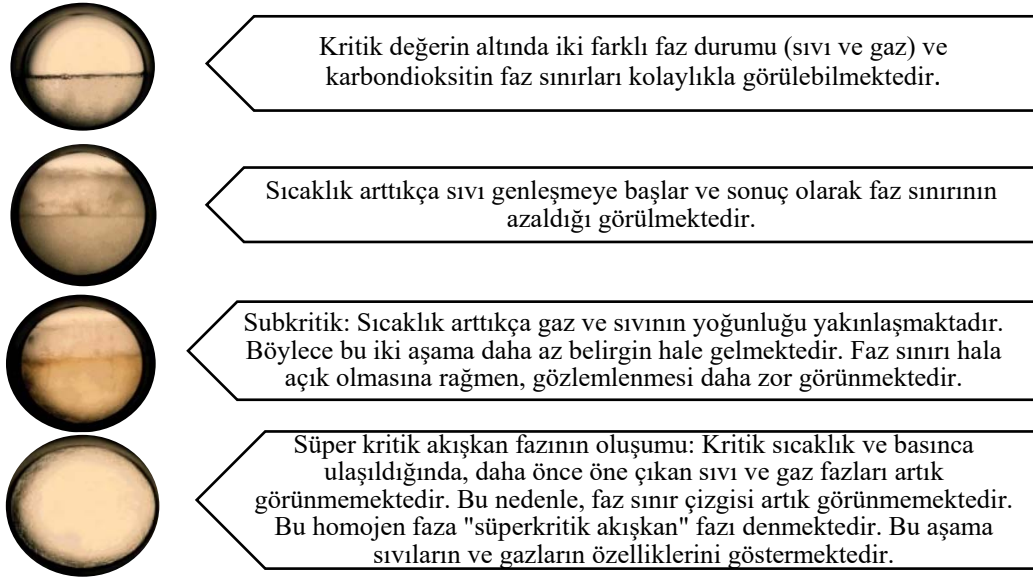
Çizelge 2.2. Akışkanların fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması (Çolak ve Tülek, 2003)

Özellik	Sıvı	Süperkritik Akışkan	Gaz
Yoğunluk (cm ³)	1,0	0,2-0,7	0,001
Viskozite (cp)	0,5-1,0	0,05-0,10	0,01
Difüzyon Katsayısı (cm ² /s)	10-5	10-4-10-3	10-1

Süper kritik akışkanların fiziksel ve taşıma özellikleri sıvıların ve gazlarınkine benzemektedir; çözünme yeteneği ise sıvılarınkine benzemektedir. Viskoziteleri gaz fazından daha düşüktür, ancak normal sıvılardan daha yüksektir. Bu özellikler çizelge 2.2'de gösterilmektedir (Çolak ve Tülek, 2003).

Süperkritiğin en önemli özelliği, basınç ve sıcaklıkla değişen yoğunluğudur. Bu özellik ve yüksek difüzyon katsayısı, ayırma işlemini kolaylaştırır ve yüksek reaksiyon hızı sağlamaktadır (Çolak ve Tülek, 2003). Düşük viskozitesi nedeniyle sıvı, liflerin veya lif

demetlerinin gözeneklerine ve kılcal sisteme daha iyi nüfuz etmektedir. Bu boyanın nüfuz etme gücü, sulu çözeltisinin üç katı kadardır. Bu, boyama verimliliğini önemli ölçüde artıran daha hızlı kütle transferine yol açmaktadır (Devrent ve diğerleri, 2006).



Şekil 2.6. Karbondioksitin süperkritik akışkan fazına dönüşme aşamaları (“An Introduction to Supercritical”, 2001)

Kritik noktanın üzerinde, süperkritik bir sıcaklık ve basınç durumu vardır. Kritik durum bölgesinde, normal durumdaki bir gaz maddesi sıvı benzeri yoğunluk sergiler ve ortalama moleküller arası mesafe azaldıkça yoğunluk arttığı için çözücü ile çözünen arasındaki etkileşimlerin sayısını en üst düzeye çıkardığı için büyük ölçüde artan bir çözücü kapasitesi meydana gelir. Ayrıca, sistemin dielektrik sabiti basınçla doğru orantılıdır, dolayısıyla sisteme çözme gücü verir. Ancak bir süperkritik akışkan iki faz (bir gaz ve bir sıvı) içermez, hem gaz hem de sıvının sahip olduğu özelliklere sahiptir. Bir süperkritik akışkan, bir gazın viskozitesi ile bir sıvının yoğunluğunun özel kombinasyonuna sahip olduğu için mükemmel bir çözücüdür. Basıncadaki küçük değişiklikler, süperkritik bir sıvının yoğunluğunu zahmetsizce ayarlayabilir. Hem sentetik hem de analitik kimyada süperkritik ksenon, etan ve karbon dioksit gibi sıvılar tarafından çeşitli nadir kimyasal olasılıklar sunulmaktadır. Süperkritik akışkanlar, bir sıvının yoğunluğunun özelliklerine sahip olsalar da diğer özellikleri esas olarak gazlar tarafından ele geçirilmiştir. Süperkritik

akışkanların polar olmayan katıları çözebilmesi, klasik ekstraksiyondan karmaşık endüstriyel işlemlere kadar çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

Son on yılda, çeşitli tekstil uygulamaları için süperkritik akışkan teknolojisinin geliştirilmesi, kirliliklerin ekstraksiyonu (temizleme), ağartma ve boyama dahil olmak üzere birçok araştırmacı tarafından odaklanmıştır (Zheng, Xu, Zhang, Xiong, Yan ve Zheng, 2017; Van der Kraan, Cid, Woerlee, Veugelers ve Witkamp, 2007). Süperkritik CO₂, tekstillerin kimyasal olarak işlenmesi için sürdürülebilir bir çözücüdür; bu nedenle, klorofloro karbonlar gibi geleneksel çözücülere bir alternatiftir. Tekstil uygulamalarında, özellikle boyamada birçok avantajı vardır (Montero, Smith, Hendrix ve Butcher, 2000; Banchemo, 2013, s. 2-17):

- Boyama işleminden sonra fazla çözücüü uzaklaştırmak kolaydır.
- Çözücünün yoğunluğunu değiştirmek mümkündür.
- Toksik olmayan ve sürdürülebilir bir solventtir.
- Süperkritik koşullara ulaşmak kolaydır.
- Sera etkisi yoktur.
- Birçok polar olmayan ve düşük molekül için iyi bir çözücüdür.
- Boyama işleminde bile liflerin fonksiyonel özelliklerini değiştirmek mümkündür.
- PET'in camsı geçiş sıcaklığını düşürmeye yardımcı olur.

Çizelge 2.3. Geleneksel sulu boyama ile süperkritik CO₂ boyamanın karşılaştırılması (Muthu ve Gardetti, 2020).

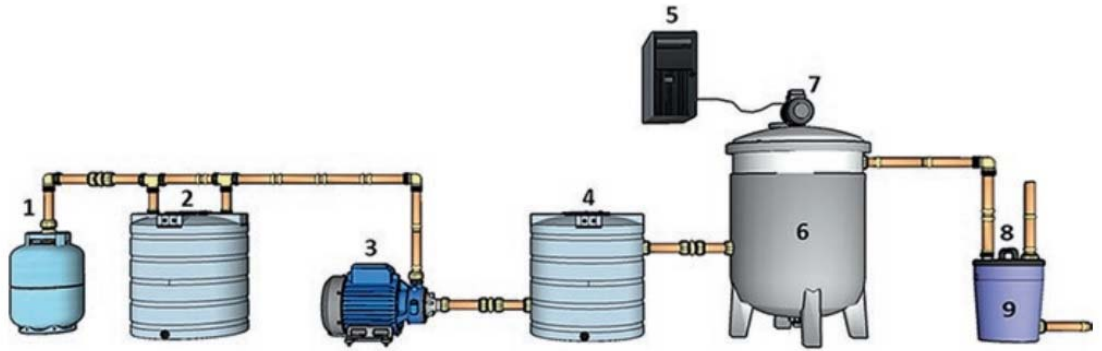
Geleneksel sulu boyama	Süperkritik CO₂ boyama
Çok miktarda atıksu üretir (boyalar ve diğer kimyasallar içerir)	Su kullanılmaz Fazla boyalar toz halindedir
Kimyasal geri dönüşüm çok zordur	Geri dönüşümün uygulanabilirliği yüksektir
Tüm boyama işlemi ~4–6 saat sürer	Renklenme hızla gerçekleşir (~2 saat yeterlidir)
Boya verimliliği çok zayıf (~%60–85)	Boya kullanımı ~%99

Daha fazla zaman aldığı için çok fazla enerji gerekir	Daha az enerji gerekir
Yatırım daha küçüktür, ancak işletme maliyeti daha yüksektir	Büyük bir yatırım gerekli, ancak süreç maliyeti düşük

Poliesterin dispers boyalarla geleneksel olarak boyanması için, büyük miktarlarda dispersiyon ajanları, tesviye ajanları, köpük gidericiler, demineralize edici ajanlar ve tesviye ajanları gereklidir. Süperkritik CO₂ boyama ile geleneksel boyamanın bir karşılaştırması Çizelge 2.3'te gösterilmektedir.

Süperkritik CO₂ boyama yöntemleri umut verici bir teknolojidir. Şekil 2.7'de basit bir boyama aparatı gösterilmektedir. Sıcaklık kontrolörleri yapan monometre ve güçlü bir soğutucu ile ısıtılmış paslanmaz çelik bir kaba sahiptir. Bu makine, 100 °C'nin altında 350 bar kapasiteli basınç tutabilir. Dispers boyalar, ürünlerle birleştirilmeden önce süperkritik CO₂ sıvısı ile birlikte makineye beslenebilirken, geleneksel boyamada durum bunun tam tersidir.

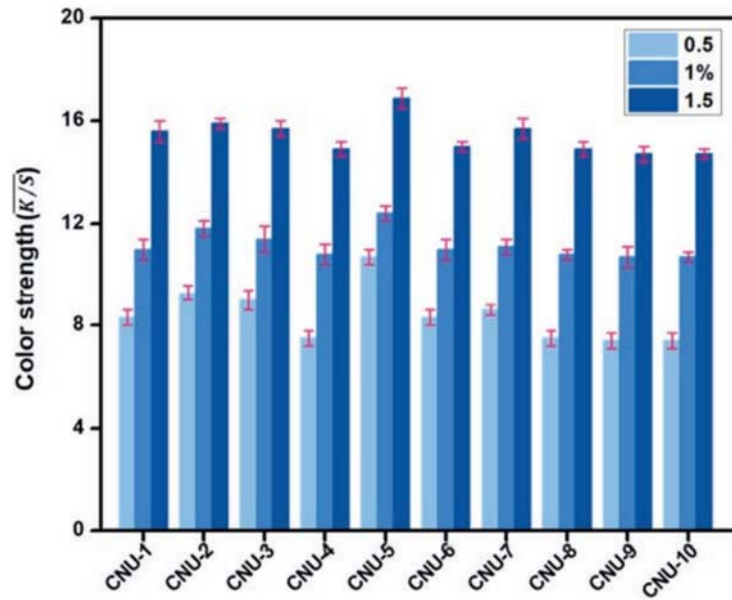
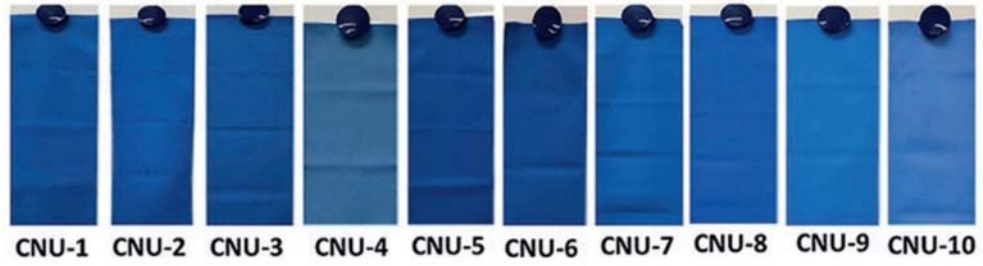
Bu yöntemde, boyalar çok iyi bir difüzyon özelliğine sahiptir, bu da yüzeyde olduğu kadar kumaşın veya elyaf malzemesinin iç yapısında da yüksek düzgünlük sağlar (Muthu ve Gardetti, 2020).



Şekil 2.7. Süperkritik CO₂ koşullarında kullanılan tipik poliester boyama aparatı (Muthu ve Gardetti, 2020)

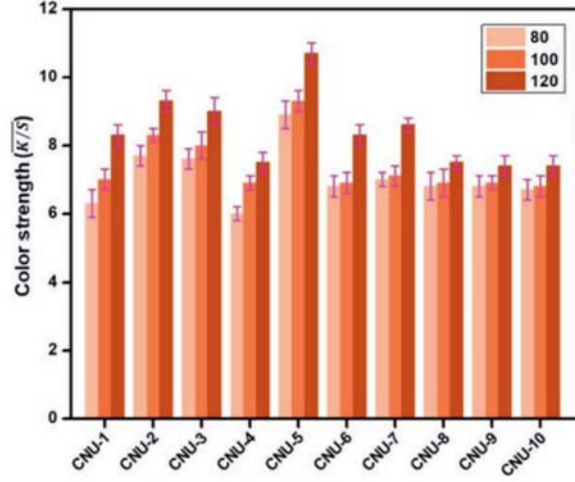
- 1- CO₂ silindiri,
- 2- Sirkülasyonlu soğutma banyosu,

- 3- CO₂ pompası,
- 4- Isıtma banyosu,
- 5- Sıcaklık kontrolör,
- 6- Karıştırıcı,
- 7- Boya banyosu,
- 8- Basınç düzenleyici,
- 9- Ayırıcı (Muthu ve Gardetti, 2020).



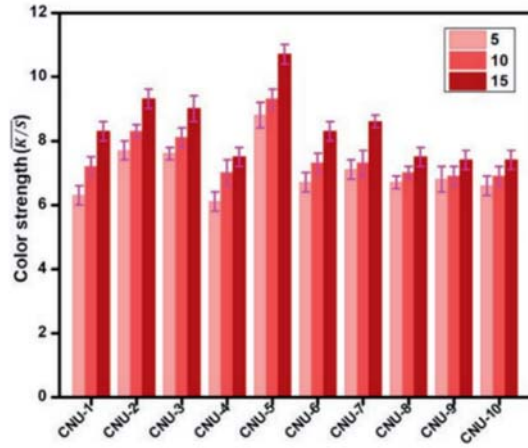
Şekil 2.8. Süperkritik CO₂ boyamada boya konsantrasyonunun renk gücü değerlerine etkisi (Muthu ve Gardetti, 2020).

Fazla boya, boyama işleminden önce ekstrakte edilebilir ve yeniden kullanım için toplanabilir. Genel olarak, renk kuvveti katlanarak boya konsantrasyonuna bağlıdır; bu eğilim süperkritik CO₂ boyama yöntemlerinde de benzerdir (Şekil 2.8).



Şekil 2.9. Süperkritik CO₂ boyamada proses sıcaklığının (80, 100 veya 120 °C) renk mukavemeti değerlerine etkisi (Muthu ve Gardetti, 2020)

Sıcaklık, boya difüzyonu açısından boyamada hayati bir rol oynayan diğer bir parametredir ve bunu renk mukavemeti takip eder. Daha yüksek bir sıcaklıkta daha fazla molekül hareketi serbestliği olduğundan, daha yüksek bir sıcaklığın boya adsorpsiyonunu iyileştirebileceği açıktır (Şekil 2.9). Süperkritik CO₂ boyama yönteminde diğer önemli parametre boyama sırasındaki basınçtır. Bu durumda, basınçtaki bir artışla renk kuvveti artar, çünkü basınçtaki artış sadece süperkritik CO₂ sıvısının yoğunluğunu artırır, bu da daha iyi boya difüzyonu ile sonuçlanır (Şekil 2.10) (Muthu ve Gardetti, 2020).



Şekil 2.10. Süperkritik CO₂ boyamada proses basıncının (5, 10 veya 15 MPa) renk mukavemeti değerleri üzerindeki etkisi (Muthu ve Gardetti, 2020).

Süperkritik akışkanlaştırılmış karbondioksitin temini uygun ve ucuzdur. Uygulamada, kritik koşulların uygulanabilirliği ve uygulanabilirliği çoğunlukla karbondioksit gazına odaklanmaktadır. Ayrıca şu anda üzerinde çalışılan diğer akışkanlar ise; nitrik oksit, amonyak, su, n-bütan, etan, etanol, eter vb. sayılabilir. Ayrıca süperkritik akışkan araştırmalarında halen çalışılmakta olan teknikler ve yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

- Parçacık tasarımı, mikronizasyon ve yeniden kristalizasyon
- Süperkritik akışkanda sentez
- Hidrojenasyon ve hidrojenasyon hazırlığı
- Süperkritik sıvı ekstraksiyonu
- Süperkritik akışkan fraksiyonu
- Süperkritik akışkan kromatografisi

Bu teknolojileri ve araştırma yöntemlerini kullanan araştırma konuları;

- Farmakoloji ve ilaçlar
- Polimerler ve polimer katkı maddeleri
- Tekstil boyaları
- Doğal ürünler (yağ, tütün, kahve, süt vb.) ve gıda
- Yüzey aktif madde ve deterjan
- Aerojel, köpük ve kozmetik
- Yağlar, lipidler, enzimler ve çeşitli katalizörler (Kaya, 2011)

Halen yukarıda belirtilen süperkritik akışkan araştırmalarını yürüten ülkeler; Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Norveç, İtalya, Birleşik Krallık, Belçika, Hollanda, İsveç, Almanya ve Türkiye'dir.

2.4.1. Tekstil boyamacılığında süperkritik CO₂ ortamının avantajları

Süperkritik CO₂ ile boyama prosesinde, poliester lifleri için boyama ortamı doğası gereği toksik olmaması, ucuz olması, yanıcı olmaması, geri dönüştürülebilir olması, kolay erişilebilir kritik koşullara sahip olması ve boyama işlemi sırasında herhangi bir dispersiyon maddesi ve yüzey aktif madde gerektirmemesi en büyük avantajlarıdır. Ayrıca, süperkritik akışkan boyama işleminde ne yıkama adımını ne de boyama sonrası kurutma adımını gerektirmediğinden, geleneksel ıslak boyama işlemi her ikisini de gerektirdiğinden enerji tasarrufu yapılabilir (Özcan ve Özcan, 2005).

Süperkritik akışkanla (susuz) boyamanın avantajları maddeler halinde sayacak olursak aşağıdaki gibi sayabiliriz:

- Su tüketiminden kaynaklanan atıksu yükünün ortadan kaldırılması,
- Atıksu arıtma süreçlerinin azaltılması,
- Proses sonrası yıkamaya gerek yoktur (indirgeyici),
- Kurutma ve kurutma atıklarının olmaması,
- Enerji tüketiminde azalma,
- Çözünürlüğün basınç kontrolü,
- Düşük viskozite sayesinde banyonun daha kolay sirkülasyonu,
- Fiber polimerin karbondioksit alması nedeniyle fibere daha hızlı difüzyon, fiber şişmesine neden olur,
- Karbondioksitin geri kazanılması ve yeniden kullanılması nedeniyle hava kirliliği oluşmaz,
- Daha az boyama,
- Su ile boyamaya göre daha kolay renk düzeltme (Yiğit, Eren ve Eren, 2019)

Tekstil endüstrisi, boya çözücüsü olarak süperkritik CO₂ kullanımından büyük ölçüde faydalanabilir. Suyu kıyasla scCO₂'de gözlenen yüksek difüzyon hızları ve düşük kütle transfer direnci; boyanın liflere nüfuz etmesini kolaylaştırır, bu da boyama sürelerinin kısalmasına izin verebilir. İşlemden su çıkarıldığı için tekstillerin kurutulmasına gerek kalmaz, bu da büyük bir enerji tasarrufu sağlar. Ayrıca, boya hidrolize edilemez, bu nedenle esasen tüm boya molekülleri fiber ile reaksiyon için mevcuttur. Süperkritik boyamada, belirli bir renk tonu için gereken boya konsantrasyonunun daha küçük olması beklenir. Su ile boyamadan farklı olarak, boya scCO₂'den sadece basıncı düşürerek kolayca çıkarılabilir. Karbondioksit ve boya daha sonra yeniden kullanılabilir, bu da işlemi ekonomik olarak uygulanabilir ve çevre açısından çekici hale getirir (Bach, Cleve ve Schollmeyer, 2002; Hendrix, 2001).

Poliesterin süperkritik ile boyanması deneysel olarak incelenmiştir. Boyama işleminde su yerine scCO₂ kullanmanın temel avantajı, CO₂ ile boyama işleminden sonra kalan boyanın kolay ayrılmasıdır. Basıncısızlaştırma, fazla boyanın çökmesine yol açar ve temiz, gaz halinde CO₂ verir, böylece her iki bileşik de geri dönüştürülebilir ve atık oluşmaz. Ayrıca, boyama işleminden sonra tekstil, sulu boyamada olduğu gibi enerji yoğun bir kurutma aşamasına ihtiyaç duymaz.

Yukarıdaki avantajlar, CO₂'nin yüksek buhar basıncının sonucudur, ancak aynı zamanda tüm süperkritik akışkanların karakteristiği olan fiziksel özellikler boyama sürecini kolaylaştırır. Moleküllerin yoğun termal hareketi ve düşük viskozite, sıvıda yüksek bir yayılma ile sonuçlanır, boyanın elyafa doğru taşınmasını kolaylaştırır.

Poliester boyama durumunda scCO₂'nin ek avantajları mevcuttur. ScCO₂ polar olmayan bir çözücü olduğundan, polar olmayan boyalar kullanıldığında dispersiyon maddesine gerek yoktur. Bu, dispersiyon maddesinin boya tozunun yaklaşık % 50'sini oluşturduğu sulu poliester boyamadan daha basit boya formülasyonlarının kullanılabilmesi anlamına gelir. Spesifik olarak poliester için bir başka avantaj, süperkritik koşullar altında CO₂ moleküllerinin polimere nüfuz etmesi ve onu şişirmesidir. Bu, tekstil liflerini plastikleştirir ve poliester içindeki boyaların difüzyon katsayılarını sulu boyamaya göre bir büyüklük ile artırır (Van Der Kraan, 2005).

Poliester elyaf boyamada süperkritik karbondioksit akışkan ortamı, başarılı sonuçları ve avantajları nedeniyle öne çıkmaktadır. Poliester lifleri dispers boyalarla bir süper kritik karbon dioksit akışkan ortamında boyanırken, boyayı içeren süper kritik akışkanın yüksek difüzyonu nedeniyle, poliester liflerinin derin gözeneklerine ve kılcal yapılarına nüfuz etme olasılığı daha yüksektir ve bir büyük kütle transfer kapasitesi ve büyük molekülleri çözme yeteneği mevcuttur (Kaya ve Güzel, 2011). Bu hidrofobik yapıya sahip poliester liflerinin daha kısa sürede etkin ve kolay bir şekilde renklendirilmesini sağlar. Süperkritik karbondioksit sisteminde boyamanın bir başka avantajı da kritik sıcaklık ve basınç kaldırıldığında karbondioksitin tekrar gaz haline gelmesi ve ortamdan geri kazanılabilmesidir (Kaya ve Güzel, 2011; “Water and chemical free”, 2019).

Elyaf içine yayılmayan fazla boya, süperkritik karbondioksit sıvısının uzaklaştırılması ve ardından karbondioksitin gazlaştırılmasıyla toz olarak geri kazanılabilmektedir (Kaya ve Güzel, 2011). Süperkritik boyama yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışmak zorunda olduğu için ilk yatırım maliyeti yüksek olmasına rağmen enerji, su ve kimyasallardan tasarruf sağlamaktadır (Burdett ve King, 1999).

2.5. Süperkritik CO₂ Ortamında Boyama ile İlgili Literatürde Yer alan Çalışmalar

Sentetik lifler polar olmayan bir yapıya sahip oldukları için süperkritik karbondioksit ortamında uygun boyalarla kolayca boyanabilirler. Bu nedenle, bu alandaki araştırmalar esas olarak bu lif grubuna odaklanmıştır. Yapılan literatür çalışmalarında poliester (Wang ve Lin, 2001; Van Der Kraan ve diğerleri, 2007; Banchoero, Ferri ve Manna, 2009; Santos, Porto, Muniz, Povh ve Rubira, 2001; Yiğit ve diğerleri, 2019), poliester/pamuk karışım (Maeda, Kunitou, Hihara ve Mishima, 2004), naylon (Van Der Kraan ve diğerleri, 2007; Liao, 2005; Liao, Ho ve Chang, 2000a), polipropilen (Liao, Chang ve Lin, 2000b; Miyazaki, Tabata ve Hori, 2012), aramid (Tong ve Kim, 2004), akrilik (Jun, Sawada, Takagi, Kim, Park ve Ueda, 2005) ve polilaktikasit (Wen ve Dai, 2007; Bach, Knittel ve Schollmeyer, 2006) liflerinin süperkritik karbondioksit ortamında boyanması ile ilgili çalışmalar yer almaktadır.

Son yıllarda, süper kritik karbondioksit ortamında, insanlar suyun poliestere, naylon, ipek ve yün liflerinin boyanabilirliği ve dispers reaktif boyalar üzerindeki etkisini araştırmışlardır (Fernandez ve diğerleri, 2007). Yapılarında vinil sülfon veya diklorotriazin reaktif grupları içeren dispers boyaların poliestere, naylon, ipek, yün ve bunların karışımlarını süperkritik karbondioksit ile etkili bir şekilde boyayabildiği gözlemlenmiştir (Ahmed ve El-Shishtawy, 2010). Maeda, poliestere/pamuk karışım kumaşların 80-120°C sıcaklık ve 10-20 MPa basınç aralığında Dispers boyaların süperkritik karbon dioksit ortamında boyanmasını incelemiş ve termosol yöntemiyle boyanmış aynı kumaşları karşılaştırmıştır. Elde edilen veriler, süperkritik karbondioksit ortamında boyanmış kumaşların boyama performansının ve yaş haslıklarının daha yüksek olduğunu göstermektedir (Maeda ve diğerleri, 2004). Tiyadiazol grupları içeren dispers azo boyalarla yapılan çalışmalar da benzer sonuçlar göstermiştir.

Poliesterin süperkritik sıvı ortamda 80°C ve 3500 psi'deki haslık değerleri mükemmel yakın olmakla birlikte sulu ortama göre daha iyi sonuç vermektedir (De Giorgi ve diğerleri, 2000). Poliesterin boya tutma hızının su ilavesiyle hiçbir ilgisi yoktur (Ahmed ve El-Shishtawy, 2010). Süperkritik karbondioksit ortamına su ilave edildikten sonra amino grupları içeren tekstil malzemelerinin boyanmasının artacağı gözlemlenmiştir, bu artış liflerin su ile şişmesinden kaynaklanmaktadır (Ahmed ve El-Shishtawy, 2010).

Doyma noktasında %75-94 arasında değişen bir fiksasyon yüzdesi ile poliestere, naylon, ipek ve yün için boyalar ile boyama elde edilmiştir (Ahmed ve El-Shishtawy, 2010).

Hou, Chen, Dai ve Zhang (2010) sıcaklık ve basıncın etkilerini incelemişlerdir. Raporlara göre, poliestere liflerinin boyanmasında, 110°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ve 20 MPa'lık basınçlarda boya alım oranı önemli ölçüde arttığı görülmüştür (Hou ve diğerleri, 2010). Tušek, Golob ve Knez, bu artışı ortam sıcaklığının artmasıyla artan moleküler zincirlerin hareketine bağlamışlar ve boyaların difüzyonu için önemli olan bu hareket nedeniyle elyafta oluşan boşluktaki artışı açıklamışlardır. Basınç değişiklikleri boya fiksaj miktarını ciddi şekilde etkilemesede, boyaların boya karışımlarına oranını etkilemekte olduğu görülmüştür (Tušek ve diğerleri, 2000).

Santos ve arkadaşları, N,N-dimetilakrilamid modifiye/modifiye edilmemiş poliestere liflerinden oluşan kumaşları dispers azo ve dispers antrakınon boyalarla süperkritik

karbon dioksit ortamında işleminden geçirmişler ve daha iyi bir dispersiyon elde etmişlerdir (Santos, Moura, Povh, Muniz ve Rubira, 2005). N,N-dimetilakrilamid kullanımı boya emilimini 3,8 kat artırsa da, bu maddenin toksik olmayan yapısı onu çevre dostu bir süreç haline getirmektedir (Santos ve diğerleri, 2001). Liao, süper kritik bir sıvı ortamda naylon 6,6 kumaşları hidrofobik reaktif boyalarla işleminden geçirerek naylon 6,6 kumaşları başarıyla boyamıştır. Boyamanın hem yıkama hem de ışık haslığının 4'ün üzerinde olduğu görülmüştür (Liao, 2005; Liao ve diğerleri, 2000a).

Süperkritik karbon dioksit ortamında polipropilen lifleri üzerinde yapılan boyama çalışmaları, bu lifin bu tip dispers boyama boyama için uygun olduğunu göstermiştir (Liao ve diğerleri, 2000b).

Ancak sonuçlar süperkritik karbondioksit ile yapılan polipropilenin daha düşük renk haslığı değerlerine sahip olduğunu göstermektedir (Liao ve diğerleri, 2000b; Miyazaki ve diğerleri, 2012). Düşük haslık değerleri sorunu ortadan kalktığında polipropilen süperkritik karbondioksit ortamında ticari boyamaya uygun liflerden biri haline gelecektir. 100°C'de boyama, polipropilen kumaşların termal büzülmesinin sınırlı olduğunu gösterir (Liao ve diğerleri, 2000b).

Miyazaki ve arkadaşları, araştırmalarında, polipropilen elyafın süperkritik karbon dioksit ortamında orta sarı renge ihtiyaç duyduğunda, izotiyazol halkasının antron nonanamit ile kaynaştığını, koyu sarı bir renk gerektiğinde N-butil ikameli Piridon azo boyar olduğunu söylemiştir. Kromofor üzerindeki alkil grubu ne kadar uzun olursa, polipropilen elyafın boyanabilirliği o kadar iyi olmaktadır. Miyazaki tarafından yapılan boyanabilirlik testi, boyanın işlenmemiş polipropilen elyafa olan afinitesini göstermiş, karbon sayısının artmasıyla boya üzerindeki alkil sübstitüentinin arttığını göstermiştir. 8-12 alkil grubu içeren boyalar, renk haslığı ve renk değeri açısından pratik kullanıma uygun değerler vermektedir (Miyazaki ve diğerleri, 2012).

Yiğit ve diğerleri (2019) Susuz boyama işlemi ve geleneksel boyamayı yöntemini karşılaştırmışlardır. %100 poliester örme kumaşlar (260 g/m²) her iki yöntemle de boyanmıştır. Dispers Blue 79 Azo High Energy Terasil Navy Grl-C (Ciba) ile boyanan

kumaşların boyama sonuçları, susuz boyama işleminin geleneksel poliester boyamadan daha fazla daha çevreci olduğunu göstermiştir. Ayrıca proses sonunda atıksu oluşmadığından susuz boyama prosesinde herhangi bir kimyasal oksijen (COD) değeri yoktur. Sonuçlar, susuz boyama işlemi ile boyanan numunelerin, liflerin şişmesi nedeniyle geleneksel yöntemlerle boyanan numunelere göre daha yüksek renk ölçümleri (K / S) değerlerine ve daha koyu renklere sahip olduğunu göstermiştir. Yıkama haslığı sonuçları, susuz boyama işlemi ile boyanan numunelerin yüksek yıkama haslık değerlerine sahip olduğunu göstermiştir, bu da susuz boyamanın herhangi bir olumsuz etkisinin olmadığını göstermektedir. Ayrıca patlama mukavemeti analizleri, susuz işlemlerle boyanan numunelerin geleneksel yöntemlerle boyanan numunelere göre daha yüksek patlama mukavemeti değerlerine sahip olduğunu göstermiştir (Yiğit ve diğerleri, 2019).

Abate ve diğerleri (2019) Yaptıkları bu çalışmada, su içermeyen ve kaynak verimli süperkritik karbondioksit (scCO₂) boyama işlemi kullanılarak poliester kumaşın doğal boya curcumin ile yeni bir mordan içermeyen boyanması araştırılmıştır. Poliester kumaş ilk kez scCO₂ ile alt tabaka ön işlemi olmaksızın kurkumin ile veya mükemmel renk mukavemeti ve homojenliği olan herhangi bir yardımcı kimyasal kullanılarak başarıyla boyanmıştır. Boyama davranışının, sistem basıncından ve ardından boyama sıcaklığından çok daha fazla etkilendiği bulunmuştur. En yüksek renk mukavemeti ve düzgünlük değerlerini sağlayan optimum boyama koşulu 120°C, 25 MPa ve 1 saat boyama süresi olduğu görülmüştür.

Üstelik, optimum boyama koşuluyla geliştirilen poliester numuneleri, yıkama ve sürtünmeye karşı mükemmel renk haslığına sahip olduğunu göstermiştir. Bu işlem, poliester kumaşların sürdürülebilir ve kaynak açısından verimli bir şekilde boyanması için umut verici bir alternatiftir (Abate ve diğerleri 2019).

2.5.1. Süperkritik CO₂ ortamında çözünürlük ve tekstilde boyama çalışmaları

Sentetik lifleri boyamak için süperkritik karbondioksitin laboratuvar ölçeğinde mükemmel sonuçlar elde ettiği gösterilmiştir. Bununla birlikte, scCO₂ kullanıldığında, boyalı doğal liflerde, özellikle pamukta çok zayıf renk derinliği ve renk haslığı

gözlemlenmiştir. Dünya pazar payının %35'inin pamuk tarafından temsil edildiği dikkate alındığında, pamuk boyama için bir yöntemin geliştirilmesi önemlidir. Her türden tekstil scCO₂'de boyama imkanı, işlemi ekonomik olarak uygulanabilir hale getirecektir. Pamukla boyama işleminin sınırlamalarını anlamak için pamuğun yapısını, boyama ortamı olarak CO₂'nin özelliklerini ve boyanın kendisini incelemek gerekir.

Boya ortamı olarak karbondioksitin en büyük sınırlaması, pamuğu şişirememesidir. Ayrıca scCO₂, pamuk liflerinde bulunan doğal nemi çıkarabilir. Bu nedenle, pamuk esnekliğini kaybeder ve camsı geçiş sıcaklığı (T_g), pamuğa zarar verdiği için yasaklanmış bir çalışma sıcaklığı olan 220 ° C'ye yükselmektedir (Fernandez, 2005).

İpek, yün, naylon ve poliester scCO₂'de vinilsülfon veya diklorotriazin reaktif grupları içeren polar olmayan iki boyayla başarıyla boyanmıştır.

Az miktarda su varlığının yün ve naylonun renklenmesini önemli ölçüde artırdığı ve ipeğin sadece su eklendiğinde boyalarla reaksiyona girdiği bulunmuştur. Hem scCO₂ hem de tekstiller suya doyurulduğunda maksimum renk derinlikleri gözlenmiştir. (Van Der Kraan, 2005).

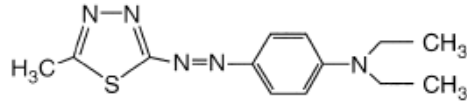
Süperkritik tekstil boyamada, boya seçimi, boyanacak elyafın tipine bağlı olan boyama mekanizmasına bağlıdır. Poliester gibi polar olmayan tekstiller için, reaktif olmayan boyalar süperkritik fazda çözülür, elyafa taşınır ve yüzeye adsorbe edilir.

Son olarak, boya molekülleri CO₂ ile şişirilmiş polimer matrisine yayılır ve burada poliester moleküllerine fiziksel çekimle, esas olarak dispersiyon kuvvetleriyle bağlanırlar. Basıncı azaltmanın ardından CO₂ molekülleri büzülen liflerden çıkar ve boya molekülleri tutulur. Bu boyama mekanizması yani polar olmayan boyalar, suda dağıldıkları sulu boyama işlemlerinde de kullanıldığından, genellikle dispers boyalar olarak adlandırılırlar (Saus ve diğerleri, 1993; Tabata, Lyu, Cho, Tominaga ve Hori, 2001).

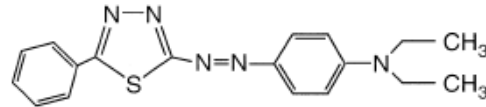
Doğal tekstiller için boyama mekanizması ve dolayısıyla boya türü farklıdır. Hidroksil gruplarının (pamuk) veya amino gruplarının (yün, ipek) varlığından dolayı bunlar polar olduklarından, dispers boyalara karşı fiziksel çekicilikleri yoktur. Bir boya molekülünü

böyle bir elyafa bağlamak için, yeterli haslığı sağlamak için kimyasal bir bağ gereklidir, bu nedenle reaktif boyaların kullanılması gereklidir (Van Der Kraan, 2005).

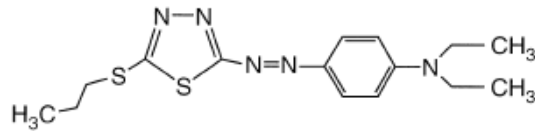
Giorgi ve diğerleri (2000) Poliester liflerinin süperkritik CO₂'de dispers boyalarla boyanması hakkında dikkate değer kalıcılığı ve dayanıklılık özelliklerinden dolayı, boyama ortamı olarak süperkritik CO₂ kullanılarak aşağıdaki boya formüllerine küçük bir temsili boyalar seti uygulamıştır. Bu çalışmanın amacı, tiyadiazolil dispers boyanın poliesterlere uygulanması için süperkritik CO₂'de boyama işleminin optimum koşullarını bulmaktır.



N,N-diethyl-4-[2-(5-methyl-1,3,4-thiadiazol-2-yl)diazenyl]-
aniline (dye 1)



N,N-diethyl-4-[2-(5-phenyl-1,3,4-thiadiazol-2-yl)diazenyl]-
aniline (dye 2)



N,N-diethyl-4-[2-[5-(propylsulfanyl)-1,3,4-thiadiazol-2-yl]-
diazenyl]aniline (dye 3)

Şekil 2.11. Farklı boyaların kimyasal formülleri (Giorgi ve diğerleri 2000)

Deneyle farklı basınç ve sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Süperkritik CO₂'de elde edilen sonuçlar, dispersiyon ajanlarının varlığında geleneksel sulu boyama kullanılarak elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, tiadiazol grubu ile azo dispers boyaların, poliester liflere karşı yüksek dayanıklılık ve mükemmel haslık sergilediğini göstermiştir.

Süperkritik sıvıdan poliester liflere uygulandığında kullanılan tiadiazolil azo boyalar sulu ortamda elde edilenlere benzer boyalar vermiştir. Çalışma, CO₂ kullanılarak, 80 ° C'de 30 dakikada, yani polimerik substratın Tg'sinin biraz üzerinde sulu boyamayla aynı boyama sonuçlarını dispersiyon ajanları kullanılmadan elde etmenin mümkün olduğunu göstermektedir (Giorgi ve diğerleri 2000).

2.6. Süperkritik CO₂ Ortamında Boyamanın Ekolojik Açından Değerlendirilmesi

1 kg tekstil üretimi için terbiye işlemlerinde yaklaşık 100-150 litre temiz su kullanılmaktadır. Bu kaynaklar sonsuz olmadığı için çevreyi ve mevcut enerji kaynaklarını korumak için bolca yenilikçi yaklaşımlar çalışılmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir çalışmalara önem verilerek mevcut süreçlerin daha ekolojik yöntemlerle değiştirilmesi gerekmektedir.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde belirtildiği gibi, temiz üretim, su ve karbon ayak izi seviyeleri, karbon emisyonu yönetimi ve eko tasarım, tekstil endüstrisinin sürdürülebilir gelişimi için önemli bir endişe kaynağıdır. Susuz boyama gibi yeni proses teknolojileri, doğal kaynakların korunması, azaltılmış tatlı su tüketimi, atıksu tahliyesi ve enerji tasarrufu gibi birçok çevresel faydaya sahiptir. Süperkritik karbondioksit atmosferinde gerçekleştirilen susuz boyama, tekstil atıklarını azaltan yenilikçi bir boyama yöntemidir. Süperkritik karbondioksit (scCO₂), kritik sıcaklığında ve kritik basıncında (31.1°C ve 73.8 bar) veya üzerinde tutulduğu sıvı haldeki karbondioksittir. Karbondioksit (CO₂), düşük kritik basıncı nedeniyle süperkritik sıvıda en yaygın kullanılan ortamdır. ScCO₂'nin güçlü geçirgenliği ve itici gücü, onu kumaş boyama için ideal bir ortam haline getirir. Üstelik, CO₂ ucuzdur, toksik değildir, yanıcı değildir, çevre dostudur ve çoğu koşulda kimyasal olarak inerttir.

Aynı zamanda scCO₂, bir gaz gibi yüksek yayılma, bir sıvı gibi düşük viskozite ve yoğunluk ve düşük yüzey gerilimi (sıfıra yakın) gibi bazı özel özelliklere de sahiptir.

Güncel scCO₂, birçok endüstriyel uygulamada su ve organik çözücüler yerine çevre dostu bir çözücü olarak kullanılmıştır (Yiğit ve diğerleri, 2019).

2.7. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) Nedir?

Çevre koruma bilincinin artmasıyla birlikte endüstri ve iş dünyası, faaliyetlerinin çevre ve toplum üzerindeki etkisini değerlendirmeye başlamıştır. Bir çevreci olarak yeşil üretim, çevre kirliliğini önleyen sistemlerle iş birliği yaparak doğayı korumayı amaçlamaktadır. Çevre dostu üretimin bu sistem ve üretim biçimine “yeşil üretim” veya “yeşil işletme” denmektedir.

Bu bağlamda yeşil ürünlerin üretilmesi ve yeşil teknolojinin endüstrinin çeşitli alanlarında uygulanması öne çıkmaktadır. Ürünlerin ve süreçlerin çevresel performansı çok önemli bir konu haline gelmiş ve bu gerçek, şirketleri çevre üzerindeki etkilerini en aza indirmenin yollarını bulmaya sevk etmiştir.

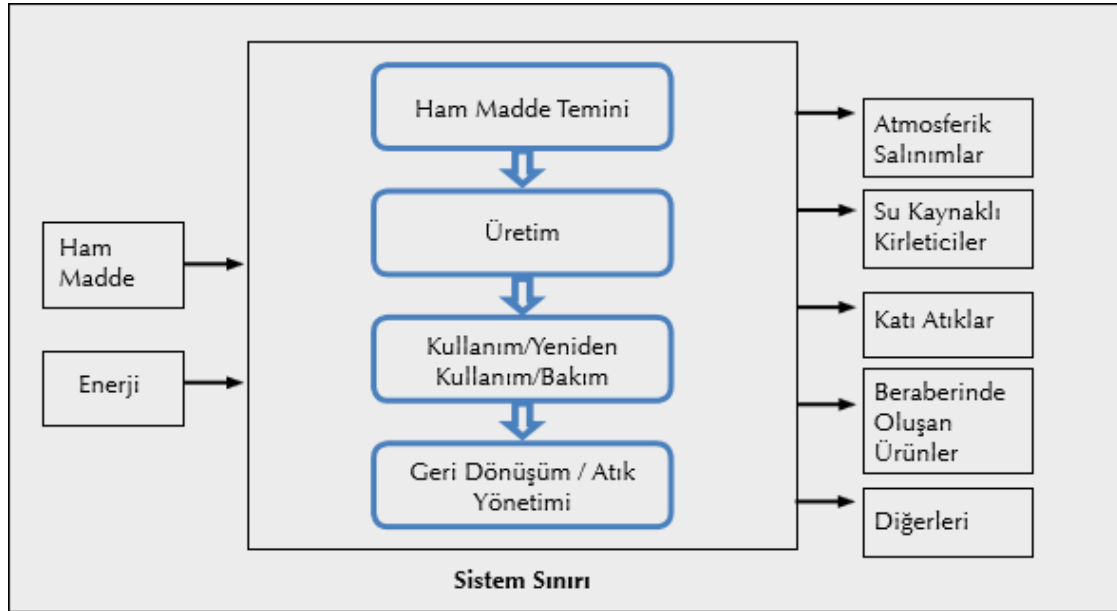
Birçok şirket, çevresel performanslarını iyileştirmek için kirlilik önleme stratejilerini ve çevre yönetim sistemlerini kullanmayı faydalı bulmaktadır. Bu nedenle Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) geliştirilen önemli teknolojilerden biridir (Güler, 2004). LCA, döngüsel ürün sistemlerinin çevresel performansını değerlendirmek için yerleşik bir metodolojidir (Braun ve diğerleri, 2021).

Üretilen her ürün, yaşam döngüsüne hammadde çıkarma ve işleme ile başlar, daha sonra ürün üretimi, dağıtım ve kullanımından geçer ve son olarak döngü bir bertaraf süreci ile sona erer. Üretilen ürünlerin yaşam döngüsünün tüm aşamaları, bir dizi çevresel etki çeşitliliğine sahiptir. Tekstiller en önemli tüketim ürünlerinden biridir ve moda, hazır giyim, endüstriyel tekstiller, jeotekstiller, tarımsal tekstiller ve hijyenik tekstiller gibi geniş kullanım alanları nedeniyle tekstil ürünlerinin çevresel etkisi çok önemlidir. Tekstil tedarik zinciri çok karmaşıktır ve son derece küresel ve merkezi olmayan bir sektör olduğu için tek bir sektör içinde ifade edilemez. Bu nedenle, tekstil ve giyim tedarik zincirinde çevresel sürdürülebilirliği anlamak hayati önem taşımaktadır (Moazzem ve diğerleri, 2018).

LCA analiz yöntemleri karar verici değil, verilen kararları destekleyici yönde çalışan bir mekanizmadır. Bu yöntem ele alınırken, sürdürülebilir kalkınma için destekleyici olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Bununla birlikte var olan diğer yöntemlerin kılavuzluğunda ekolojik anlamda gelişme gösterebilme olanağına sahip firmalarla paralel incelemeler yapılması tavsiye edilmektedir.

Yaşam Döngüsü Analizi (LCA), ürünlerde, süreçlerde veya hizmetlerde kullanılan enerji, hammadde, atık ve emisyonların çevresel etkilerinin yanı sıra doğal kaynakların tüketimini ve çevresel iyileştirmeleri değerlendirmek için kullanılan bir araçtır. (Butekom, 2020).

LCA yöntemi, tüm ilgili üretim, nakliye ve tüketiciler tarafından kullanım dahil olmak üzere ürün veya hizmet üretmek için kullanılan hammaddelerin satın alınmasından başlayarak, yaşam döngüsünün farklı aşamalarında (Şekil 2.13) çevresel etkileri belirlemek, raporlamak ve yönetmek için kullanılmaktadır. Bu çevresel etkiler, iklim değişikliği, stratosferik ozon incelmesi, ötrofikasyon, asitletme ve toksik emisyonlar gibi doğal kaynak tüketimi bazında değerlendirilmektedir (Demirer, 2011a).



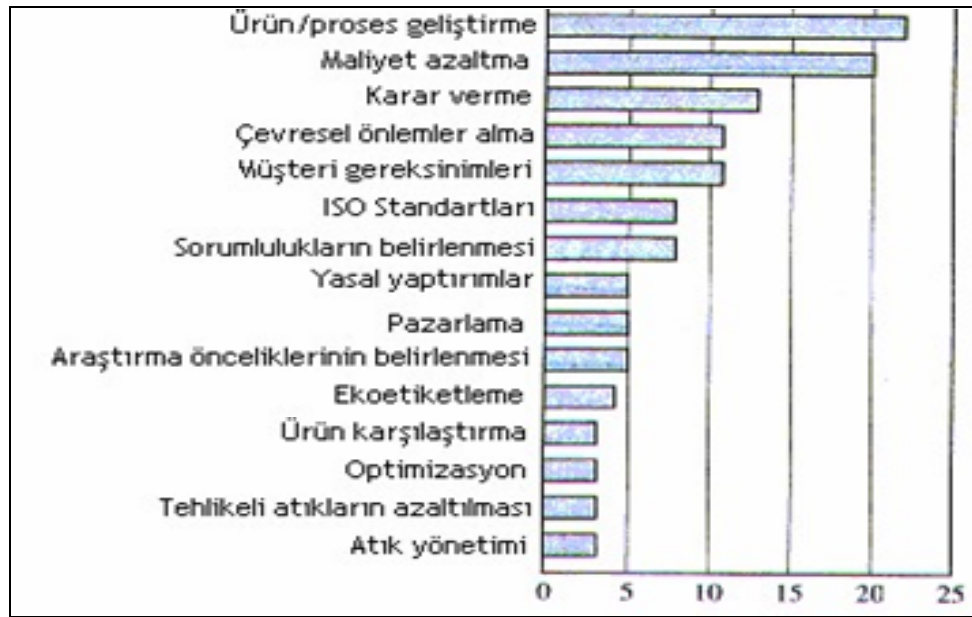
Şekil 2.12. LCA'nın aşamaları (Demirer, 2011a)

Yaşam döngüsü analizinin önemli bir özelliği, üreticilerin tasarımdan imhaya kadar ürünlerinin kirliliğinden sorumlu olmalarıdır. Bu özellik, LCA'yı geleneksel konseptten ayıran temel faktördür. Geleneksel konsept, "sorumluluğun hammadde alımı ile başlayıp bitmiş ürünlerin satışı ile sona ermesi"dir (Bishop, 2000).

LCA'da, bir ürün veya sürecin yaşam döngüsü aşamasında meydana gelen tüm etkiler dikkate alınır. Bu nedenle, yöntem, iki olası seçeneğin karşılıklı ilişkisini değerlendirmek için de kullanılabilir. Örneğin floresan lambalar ile akkor lambaları karşılaştırırken sadece enerji kullanımının etkisini göz önünde bulundurursanız floresan lambalar daha az enerji tükettikleri için olumlu bir konumda olacaktır.

Bununla birlikte, kontrol etme faktörü toksik atık üretimi ise, flüoresan lamba toksik cıva içerdiğinden karşılaştırılabilirliğini kaybedecektir. Bu durumda LCA, tüm çevresel etkilerin dikkate alınmasını sağlar ve hangi ürünün kullanılacağına ilişkin karar verme sürecine yardımcı olmaktadır (Bishop, 2000).

LCA farklı amaçlar için kullanılabilir. Şekil 2.14'te verilen LCA'nın kullanım amacı ve bu amaçlara göre kullanım ağırlığı dikkate alınarak ürün/süreç geliştirme ve maliyet düşürmeye öncelik verilmekte, karar verme, çevresel gereklilikler ve müşteri ihtiyaçları ikinci sırada yer almaktadır (Bishop, 2000).



Şekil 2.13. LCA'nın uygulama alanlarına göre kullanım sıklığı (Bishop, 2000)

2.8. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Tarihçesi ve Geleceği

LCA, 1960'ların sonlarında küçük bir grup insan tarafından kullanılan katı atık tanımlama sisteminden geliştirilmiş ve ISO 14040 serisi olarak Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından yönetilen çevre yönetim sistemine yerleştirilmiştir (James, 2003).

LCA'nın ilk öncüsü 1960'ların sonunda, 1970'lerin başında Kaynak ve Çevresel Profil Analizleri (REPA) olmuştur.

İlk olarak Midwest Araştırma Enstitüsü daha sonra Franklin Associates Ltd. Danışmanlık Şirketi tarafından yürütülmüştür. REPA çalışmaları yapan iki şirket Coca Cola ve Mobil Corporation firmalarıdır. 1980'li yıllara gelindiğinde LCA ile ilgili çalışmalara Gaines'in (1981), Lundholm ve Sundstorm (1985) karar verme ve metod geliştirme ile devam etmişlerdir. Atık üretimi, enerji girdileri ve hammadde talepleri gibi konular REPA çalışmalarında irdelenmiştir. LCA yönteminin geliştirilmesinin sonraki aşamalarında araştırmacılar çevresel etki sınıflandırması yoluyla daha karmaşık analizler yapmaya çalışmışlardır (Güler, 2004).

§
LCA ile ilgili bir başka ilk çalışma 1970'lerde ortaya çıkmıştır ve Net Enerji Analizi olarak adlandırılmıştır. 1973 ve 1979'daki küresel petrol krizi sırasında Filipinler, Amerika Birleşik Devletleri ve Brezilya dahil birçok ülke petrolün yerini alabilecek ürünler keşfetmeye başlamışlardır.

Petrol alternatif yakıtları için yapılan arama araştırmalarından biri, etanol-karbonhidrat biyokütle fermantasyonu yoluyla biyoetanol üretimidir. Brezilya'da geliştirilen ProAlkol programı biyoetanol ticaretinde başarılı olmuştur ve yirmi yılı aşkın süredir devam etmektedir. Burada ortaya çıkan sorunlardan biri biyoetanol üretiminin yaşam döngüsündeki enerji tüketimidir. Net enerji analizi, nihai ürünün enerji değerini biyoetanolün yaşam döngüsüne giren birikmiş enerji ile karşılaştırmak için kullanılır. Bunun gibi bir karşılaştırma, alternatif yakıtların geleneksel enerji kaynaklarının yerini aldığını ve yaygınlaştığını göstermektedir. Bu nedenle, bu enerji analiz teknikleri, yakıt

ve enerji sistemleri için gelişmiş LCA'nın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu LCA'lar artık Tam Yakıt Döngüsü Değerlendirmeleri (FFCA) olarak adlandırılmaktadır (Güler, 2004).

Öte yandan, modern LCA yöntemi, 1990'lar boyunca standartların gelişimini araştırmıştır. SETAC, bu konuda ilk girişim olarak "Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin Teknik Yapısı" (1991) adlı uluslararası bir LCA standardı yayınlamıştır. Standart, hedef tanımlama, envanter değerlendirme, etki değerlendirme ve geliştirme analizi gibi çağdaş LCA'nın bileşenlerini açıkça ortaya koymaktadır (Güler, 2004).

1990'ların sonlarında ISO, ISO 14000 çevre yönetim standartlarına yardımcı olmak için ISO 14040 serisi LCA'ları yayınlamıştır. Bu seriler Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. ISO 14040 Çevre Yönetimi – LCA Serisi (ISO 14040 Çevre Yönetimi, 2016)

Standart No	LCA Standardının Adı	Durum
ISO 14040	Çevre Yönetimi-Hayat Boyu Değerlendirme-Prensip ve Çerçeve	1.baskı (1997)
ISO 14041	Çevre Yönetimi-Hayat Boyu Değerlendirme-Amaç ve Kapsam Tanımı ile Envanter Analizi	1.baskı (1998)
ISO 14042	Çevre Yönetimi-Hayat Boyu Değerlendirme-Hayat Boyu Etki Değerlendirmesi	1.baskı (2000)
ISO 14043	Çevre Yönetimi-Hayat Boyu Değerlendirme-Hayat Boyu Yorumu	1.baskı (2000)
ISO 14040	Çevre yönetimi-Hayat boyu değerlendirme-İlkeler ve çerçeve	1.baskı (2006)

Fakat günümüzde ISO 14040 standardı 2006 yılında teknik olarak revize edilmiştir. Çizelge 2.4'te verilen tüm seriler ISO 14040 altında toplanmış "Çevre yönetimi-Hayat boyu değerlendirme-İlkeler ve çerçeve" şeklinde bahsedilen serilerin yerini almıştır.

LCA yöntemi 1960'larda başlayan araştırmaların bir sonucudur. Çeşitli ürünleri karşılaştırmayı ve tüm yaşam döngülerine göre çevre üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Avrupa Birliği ülkeleri, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Güney Kore, Kanada ve Avustralya gibi birçok ülkede çevre politikalarının ve birçok gönüllü girişimin ana aracı haline gelmiştir. Bu yoğun kullanımla birlikte, LCA'ya farklı etki

kategorileri (biyolojik çeşitlilik, gürültü gibi) eklenmiş ve LCA, çeşitli projelerin sosyal ve ekonomik boyutlarını değerlendirmek için kullanılmıştır (Demirer, 2011a).

Avrupa Birliği tarafından desteklenen CALCAS (Sürdürülebilirlik Yaşam Döngüsü Analizi İnovasyon Koordinasyonu Eylemi) projesinin en önemli çıktılarından biri Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi (YDSA) yöntemidir. Bu yöntem, sürdürülebilirlik araştırması kapsamında LCA'nın ihtiyaç duyduğu bilgi, model ve çalışmaları belirlemeyi ve tamamlamayı amaçlamaktadır. YDSA, çevresel etkiye odaklanan ve sürdürülebilirliğin üç boyutunu da kapsayan mevcut LCA yönteminin genişletilmiş bir versiyonu olarak da düşünülebilmektedir.

YDSA, ürüne özel LCA yöntemlerini sektörel veya ekonomik boyuta getirmek için daha geniş bir araç olarak tasarlanmıştır (Demirer, 2011a).

2.9. Yaşam Döngüsü Analizi Çevresel Etki Kategorileri

Yaşam Döngüsü Analizi'nin çevresel etki kategorilerine aşağıdaki gibi sıralanmaktadır. Bu listede verilen etki kategorileri, tüketilen her türlü ürünün çevreye ve gelecek nesillere etkilerini maddeler halinde belirtmiştir.

Etki kategorileri

Küresel Etkiler

Küresel ısınma – kutuplarda erime, toprakta nem kaybı, uzun mevsimler, orman kaybı/ değişimleri ve rüzgâr ve okyanus hareketlerinde değişimler

Ozon tüketmesi – Ultraviyole radyasyonda artış

Doğal kaynaklarda tüketme – Gelecek nesiller için doğal kaynaklarda azalma

Bölgesel Etkiler

Fotokimyasal dumanlı sis – “dumanlı sis”; görüşün azalması, göz tahrişi, solunum sistemi ve akciğer tahrişi ve bitki örtüsüne zarar

Asidifikasyon – korozyon oluşumu, sucul ortamlarda asidifikasyon, bitki örtüsü etkileri ve toprak etkileri

Yerel Etkiler

İnsan sağlığı – Hastalık ve ölüm oranında artış

Karasal zehirlilik – Biyoçeşitlilik ve doğal yaşamda azalma

Sucul zehirlilik – Su bitkilerinde, diğer canlı türlerde, biyo-çeşitlilikte, ticari veya hobi balıkçılıkta azalma

Ötrofikasyon – Besiyer maddelerin (özellikle azot ve fosfor) göller, haliçler ve yavaş hareket eden nehirler gibi sucul ortamlara ulaşarak, aşırı bitki büyümesine ve oksijen tüketimine yol açması.

Arazi kullanımı – Doğal yaşam için gerekli olan karasal yaşam alanı kaybı ve düzenli depolama alanında azalma

Su kullanımı – Mevcut yüzey ve yer altı su kaynaklarında azalma

Şekil 2.14. Yaşam Döngüsü Analizinin Çevresel Etki Kategorileri (Demirer, 2011a)

LCA, ürünler (veya hizmetler) ile ilgili olası çevresel boyutları değerlendirmek için geçerli girdi ve çıktı verilerinin toplanmasını, bu girdi ve çıktıların sahip olabileceği çevresel etkilerin değerlendirilmesini ve verilerin ve etki aşamasının sonuçlarının ve araştırma amaçlarının yorumlanmasını içeren bir teknolojidir (Çamur, 2010).

Kohler ve Moffat'a göre LCA, genel çevresel değerlendirme için en uygun yöntemdir (Çamur, 2010).

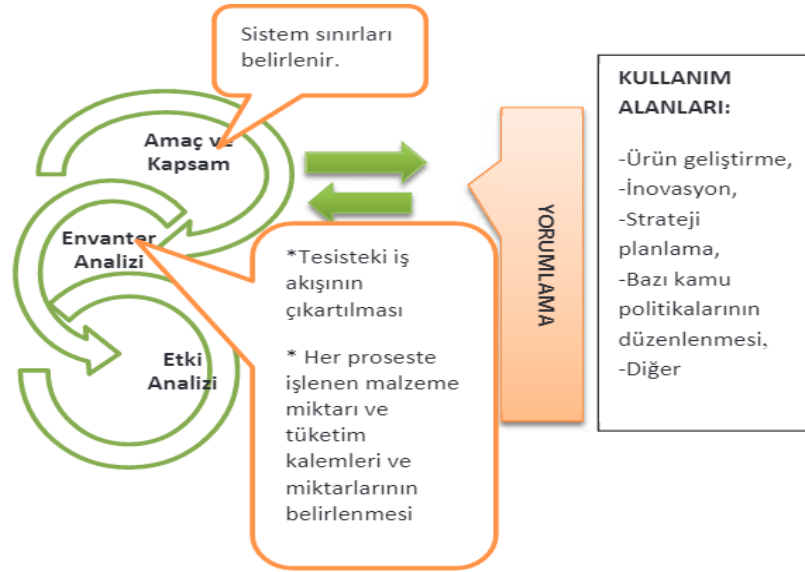
Scheuer ve Keoleian'a göre LCA, sistemdeki tüm madde ve enerji akışlarının ölçüldüğü ve değerlendirildiği entegre bir yöntemdir. Genel olarak bir ürün veya hizmet sisteminin yukarı akış (hammadde çıkarma, üretim, nakliye ve inşaat), kullanım ve aşağı akış (yok etme ve atık) araştırılmaktadır. Daha sonra enerji tüketimi, atık üretimi ve bir dizi etki kategorisi (küresel ısınma, asitlenme vb.) bazında küresel ve bölgesel etkiler hesaplanmaktadır (Çamur, 2010).

2.10. Yaşam Döngüsü Analizinin Aşamaları

Yaşam döngüsü değerlendirmesi, sistematik bir dizi prosedür kullanarak herhangi bir ürün veya sürecin potansiyel çevresel etkisini belirlemeye yönelik bir tekniktir. Bir ürün veya sürecin çevresel etkisini değerlendirmek için belirli prosedürler ve standartlar izlenir. LCA, ISO14040:2006 standardına göre dört adımdan oluşur (Moazzem ve diğerleri, 2018).

Yaşam döngüsü analizi dört temel kısımdan oluşmaktadır (Butekom, 2014). Bunlar;

- Amaç ve kapsam tanımı
- Envanter analizi
- Etki değerlendirmesi
- Yorumlama



Şekil 2.15. Yaşam Döngüsü Analizinin Aşamaları (Butekom, 2014).

2.10.1. Yaşam döngüsü analizi 1.aşama: amaç kapsam ve tanımı

Amaç ve kapsam tanımı, yaşam döngüsü değerlendirmesinin ilk aşamasıdır. Yaşam döngüsü değerlendirme hedef tanımlama aşamasında; yaşam döngüsü değerlendirmesinin amacı, tasarlanan uygulama, araştırmanın gerekçesi ve hedef kitle sorgulanamaz bir şekilde ifade edilmelidir (Gündüz, Alay ve Özdoğan, 2012).

Kapsam tanımı, sistemi ve sınırlarını (girdi, çıktı, üretim, dağıtım, nakliye, atık bertaraf senaryoları gibi işleme birimleri), veri gereksinimlerini ve çalışmada yer alan tahminleri belirtmelidir. Kapsam, araştırmanın amaçlarını desteklemelidir. Kapsam tanımlanırken sistem fonksiyonları, fonksiyonel birimler, tahsis (tahsisat) prosedürleri, kullanılacak etki analizi yöntemleri ve veri kalitesi gereksinimleri (tarihsel, coğrafi, teknik vb.) de verilmelidir (Gündüz ve diğerleri, 2012).

Araştırma kapsamı; LCA'yı yürütmek ve ilk hedeflere ulaşmak için araştırmanın uygun genişlik, derinlik ve detayları açıkça tanımlanmalıdır.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi tekrarlanması gereken bir teknik olduğundan, çalışma sırasında ek bilgiler toplanırsa çalışmanın kapsamı gözden geçirilmelidir (Gündüz ve diğerleri, 2012).

2.10.2. Yaşam döngüsü analizi 2.aşama: envanter analizi

Bu aşamada çalışılan sistem sınırları için enerji, su, hammadde kullanımı ile çevresel emisyonlar belirlenmektedir (Demirer, 2011b). Envanter Analizi bölümü ham verilerin toplandığı ve analiz edildiği oldukça zaman ve emek gerektiren bir bölümdür.

Bu bölümde aşağıdaki sorulara da yanıt aranmaktadır.

- İşlev ya da işlevsel birim nedir?
- Sınırlar nelerdir?
- Hangi verilere ihtiyacımız var?
- Kabullerimiz nelerdir?
- Sınırlamalar var mı?

Envanter analizi için, yaşam döngüsünün tüm aşamalarında malzeme tüketimi, atık ve boşaltma profilleri için verileri toplanmakta ve filtrelenmektedir. Veriler yaşam döngüsünün aşamalarının hepsinden toplanmalıdır. Ürün sisteminin ilgili girdi ve çıktı verileri, sistemle ilgili kaynakların kullanımını ve havaya, suya ve toprağa deşarjını içerecektir. Toplanan veriler nitel veya nicel olabilmektedirler. Envanterde yer alan nitel ve nicel veriler, sistem sınırında verilen her işlem için toplanmalıdır (Gündüz ve diğerleri, 2012).

Bir envanter analizi (ISO 14041) oluşturabilmek için en kaliteli verilerin toplanması gerekmektedir. Veri kullanılırken veri kalitesi göstergeleri de dikkate alınmalıdır (Gündüz ve diğerleri, 2012).

Veri kalitesi göstergeleri toplanan verinin;

-Kesinlik

-Bütünlük

-Temsil edilebilirlik

-Uygunluk/Tutarlılık

-Tekrarlanabilirlik açısından değerlendirilmesidir (Gündüz ve diğerleri, 2012).

2.10.3. Yaşam döngüsü analizi 3.aşama: etki değerlendirmesi

Yaşam döngüsü değerlendirmesinin üçüncü aşaması etki değerlendirmesidir. Bir yaşam döngüsü envanter değerlendirmesi sonucunda elde edilen verilerin potansiyel çevresel etkisinin değerlendirilmesine yönelik ilkeleri içermektedir. Kategori tanımı, sınıflandırma, karakterizasyon ve değerlendirme/ağırlıklandırma ana konularını kapsamaktadır.

Yaşam döngüsü etki analizi yapısı ve prosedürleri şeffaf olmalı ve çok çeşitli uygulamalar için esneklik ve pratiklik sağlamalıdır. Ürün/sistemden etkilenen çevresel alanlar "kategori göstergeleri" ile temsil edilmektedir. Bu göstergeler;

- Stratosferik ozon tüketimi (CFC-11 eşdeğeri)
- İklim değişimi (CO₂ eşdeğeri)
- Foto-oksidan oluşum potansiyeli (Etilen eşdeğeri)
- Asidifikasyon (SO₂ eşdeğeri)
- Suyun ötrofikasyonu (PO₄ eşdeğeri) olarak sınıflandırılabilir.

2.10.4. Etki değerlendirmesi adımları

- **Sınıflandırma:** Tüm maddeler çevre üzerindeki etkilerine göre sınıflandırılmalıdır. Örneğin sera etkisine neden olan veya ozon tabakasını tahrip eden maddeler iki

kategoriye ayrılmalıdır. Bazı maddeler birden fazla kategoriye dahil edilebilir. Örneğin NOx'in toksik, asitleştirici ve ötrofikasyon etkileri olduğu bilindiği için 3 farklı kategoriye ayrılmaktadır.

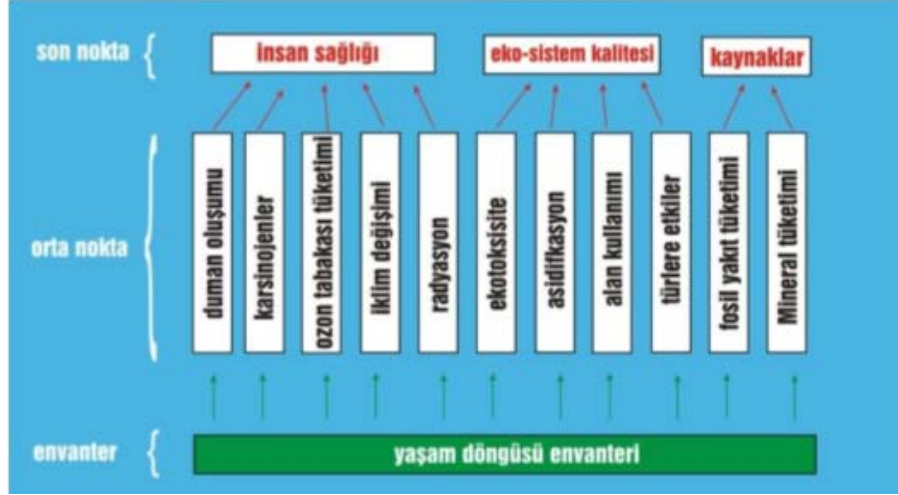
- **Karakterizasyon:** Etki puanları oluşturmak için her kategorideki öğeleri kümeleme sürecidir. Bazı maddeler diğerlerinden daha güçlü bir etkiye sahip olabilmektedirler. Bu nedenle, sadece ilgili maddelerin miktarını toplamak yeterli değildir ve bu aşamada ağırlıklandırma katsayılarının uygulanması gerekebilmektedir.

Örneğin, asitleştirme durumunda, HCl karakterizasyon faktörü 0.88'dir. Çünkü protonların %88'i 1 kg SO₂'den salınmaktadır.

- **Normalleştirme:** Bu adım, etkinin göreceli boyutunu daha iyi anlamak için ürün yaşam döngüsünde hesaplanan her etkinin ve kategorinin bilinen toplam etkisinin karşılıklı test edilmesini içermektedir.

- **Kategori bitiş noktası:** kullanılan etki değerlendirme yönteminin türüne (veri hesaplama yöntemi) dayalı olarak etki kategorilerinin birleştirilmesiyle oluşturulan son noktayı ifade eder. Hesaplama prosedürü olarak kullanılan bazı yöntemler "kategori bitiş noktaları (uç noktalar)" bazında ise "etki kategorisi (orta nokta)" ilkesi esas alınmaktadır. Orta nokta ilkesine dayalı yöntemde sonuçlar etki kategorisine göre verilir ve buna göre açıklanır. Uç noktalar ilkesine dayalı yöntemde, etki kategorilerine (orta noktalar) göre uç noktalar oluşturulur (sınıflandırılır) ve bu uç noktalara göre sonuçlar verilmektedir.ş

ş



Şekil 2.16. Orta Nokta-Son Nokta Yaklaşımı (Gündüz ve diğerleri, 2012)

- **Nitelendirme faktörü:** Çevresel yükün etki kategorisine katkısını hesaplamak için kullanılmaktadır, projeye göre yeterlilik katsayısı olan çizelgeler bulunmaktadır. Örneğin, küresel ısınma metanının (CH₄) karakteristik faktörü 56 g eşdeğer CO₂/g metandır.

Emisyon ölçüm sonucunun üründen salınan 30 g metan olduğu tespit edilirse, bu miktar ürünün ürettiği metanın küresel çevreye katkısını gösteren 1652 g eşdeğer CO₂ karakteristik faktörü ile çarpılmaktadır. Bu şekilde görüntülenen tüm etkiler hesaplanır ve aynı kategoriyi temsil eden etkiler eklenir. Hesaplamaları gerçekleştirmek için piyasada bulunan bilgisayar yazılımlarını kullanabilmektedir. Farklı hesaplama yöntemleri de mevcuttur. Bu yöntemlerden sonuçları yorumlamak için en uygun yöntem seçilmelidir (Gündüz ve diğerleri, 2012).

2.10.5. Yaşam döngüsü analizi 4.aşama: yorumlama

Envanter analizi ve etki değerlendirme aşamasının sonuçları değerlendirilir ve karşılaştırma sonuçlarından tercih edilen ürün, süreç veya hizmet seçilmektedir. Bu seçim döneminde yapılan tahminler ve belirsizlikler LCA çalışmasında açıkça yer almaktadır (Demirer, 2011b).

Yorum, yaşam döngüsünün diğer üç aşaması arasında gerçekleştirilmektedir. Envanter analizi ve etki değerlendirmesi sonuçları, hedef ve kapsam tanımlarındaki gereksinimleri karşılamıyorsa, envanter analizinin sistem sınırları değiştirilmeli, daha fazla veri toplanarak geliştirilmeli ve ardından gelişmiş bir etki değerlendirmesi yapılmalıdır. Bu yinelemeli süreç, hedef ve kapsam aşamasında belirtilen gereksinimler karşılanana kadar tekrarlanmalıdır:

1. **Kilit çevresel konuları tanımlanması:** Bunun amacı, envanter analizi ve etki analizinden elde edilen bilgileri, değerlendirme unsurlarıyla etkileşime giren kilit konuları belirlemek için hedeflere ve kapsam açıklamalarına göre yapılandırılmaktır.
2. **Tamlık, duyarlılık ve tutarlılık açısından değerlendirme yöntemleri ve sonuçları:** Etki analizinde bulunan sonuçların tamlık, duyarlılık ve uygunluk açısından kontrol edilmesi ve yorumlanması, bu sonuçlara dayalı olarak tavsiyelerde bulunulması ve raporların hazırlanmasında uyulması gereken temel noktalar açıklanmıştır.
 - **Bütünlük kontrolü:** Gerekli tüm verilerin elde edilmesi ve kullanılmasının kontrolüdür.
 - **Duyarlılık analizi:** Tahminlerin, yöntemlerin ve verilerin değişkenliğinin sonuçları nasıl etkilediğini analiz edilmektedir.
 - **Uygunluk kontrolü:** Veri toplamanın, modellerin, tahminlerin ve yöntemlerin tüm yaşam döngüsüne veya farklı ürünlerin tüm yaşam döngüsüne uygulanıp uygulanmadığını kontrol edilmelidir.
3. Sonuçların, hedef ve kapsam tanımlarındaki gerekliliklerle uyumluluğu kontrol edilmelidir.
4. Yukarıdaki prosedürler sağlanırsa sonuç olarak bir rapor yazılmalıdır, sağlanmazsa birinci ve ikinci adımlara dönmelidir. Bu işlem üçüncü adım tamamlanana kadar tekrarlanmalıdır (Gündüz ve diğerleri, 2012).

Tam puanlama durumunda, genellikle en düşük puana sahip alternatif tercih edilir. Ancak bazı durumlarda puanın daha da düşürülüp düşürülemeyeceği konusunda yeni bir çalışma yapılması önerilebilir (Gündüz ve diğerleri, 2012).

§
Araştırma sonuçları ve öneriler gerçek bilgi ve verilere dayanmalıdır. Bu durumda araştırmadaki belirsizlikler ve sonuçlar net bir şekilde değerlendirilmelidir. Bazı durumlarda LCA bulgular veya verilerdeki belirsizlikler veya sınırlamalar nedeniyle hangi ürün veya üretim sürecinin daha iyi olduğunu belirleyemez. Güvenilir veri eksikliği, veri toplamadaki zorluklar, yetersiz araştırma zamanı tahsisi veya kullanılan sınırlı kaynaklar nedeniyle çok sayıda varsayım, LCA'yı tamamen spesifik sonuçlar elde edememesine rağmen, LCA'nın sonuçları alternatif karşılaştırma için yardımcı olabilmektedir (Gündüz ve diğerleri, 2012).

2.10.6. Sonuç raporunun hazırlanması

LCA çalışması tamamlandıktan sonra, elde edilen sonuçların anlaşılması kolay bir şekilde ifade edildiği bir nihai rapor hazırlanmaktadır.

Çizelge 2.5. Bir sonuç raporunun içeriğinin genel olarak bölümleri (Gündüz ve diğerleri, 2012).

➤ İdari Bilgiler
a. LCA çalışması yapan proje ekibinin tanıtımı b. Raporlama tarihi c. İletişim bilgileri
➤ Çalışmanın Amacı ve Kapsamı
➤ Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (veri toplama ve hesaplamalar)
➤ Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme Çalışması (yöntem, etki değerlendirme çalışması sonuçları)
➤ Yorumlama
a. Sonuçlar b. Ön kabuller ve çalışmanın sınırları c. Veri kalitesini değerlendirme
➤ Hakemler Tarafından Değerlendirme
a. Hakemlerin ismi ve iletişim bilgileri b. Değerlendirme raporu c. Önerilere verilen cevaplar

Rapor, araştırmanın tamamını (örneğin araştırma organizasyonu, izlenen yöntemler, toplanan veriler, ön kabul, sonuçlar) yansıtmalı ve karar vericiler, tüm paydaşlar ve konuyla ilgilenen okuyucular için bir rehber olmalıdır (Gündüz ve diğerleri, 2012).

2.11. Yaşam Döngüsü Analizinin Kullanım Alanları

LCA'nın ana uygulama alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Belirli ürünlerle ilgili sorunları analiz edilmesi,
- Ürün geliştirme araştırmalarını etkileyen önemli parametrelerin belirlenmesi,
- Yeni ürün tasarımı,
- Benzer ürünler, süreçler ve hizmetler arasından seçim yapılması (Demirer, 2011a).

LCA'nın uygulandığı alanlar uluslararası ISO 14040 standardında tanımlanmış ve dört ana başlığa ayrılmıştır. Bu nedenle, LCA;

- Kamusal yaşam döngüsünün tüm aşamalarında ürün ortamını iyileştirme olasılığını belirlemek,
- Kamu ve özel sektörde stratejik planlama, öncelik belirleme, ürün ve hizmet tasarımı ve mevcut tasarımların güncellenmesi konularında kararlar almak,
- Ölçüm teknikleri de dahil olmak üzere çevresel performans göstergelerine ilişkin kamu politikaları oluşturmak,
- Pazarlama amaçlı (çevresel ürün beyanları ve çevre etiketleri gibi) (Çamur, 2010).

Öte yandan Nebel, yedi projede LCA'nın uygulama alanlarını tartışmış ve LCA sonuçlarının aşağıdaki çeşitli uygulamaları desteklemek için kullanıldığına dikkat çekmiştir:

- Ürün tasarımı ve ürün geliştirme,
- Kanunları halka duyurmak,
- Pazarlama,

- Stratejik plan,
- Ürün zinciri yönetimi,
- Karşılaştırma,
- Etiketleme ve ürün beyanları için (Çamur, 2010).

LCA sonuçları kullanılarak hazırlanan çevresel ürün beyannameleri ve çevre etiketleri, ürünün çevresel özellikleri hakkında bilgi vermektedir.

LCA kullanıcılarının anket sonuçlarına göre, LCA'nın ana kullanımları arasında iş geliştirme stratejisi (%18), araştırma ve geliştirme (%18), ürün veya süreç tasarımı (%15) ve eko-etiket veya ürün beyanı (%11) yer almaktadır (Demirer, 2011a).

LCA' nın yukarıda tanımlanan geniş çaplı uygulama seçenekleri LCA sonuçlarını kullanabilecek birçok kullanıcının var olduğunu göstermektedir. Bu kullanıcılar:

- Endüstri veya diğer ticari girişimler,
- İdari ve düzenleyici kuruluşlar,
- Tüketici kuruluşlar ve çevresel gruplar,
- Tüketiciler.

Nebel hangi kullanıcıların LCA'yi hangi amaçlar için kullandığını da belirterek endüstrinin, LCA'yı üretim işleminde ve ürünün kullanım aşamasında çevresel noktalarının tespit edilerek ürün tasarımı ve geliştirilmesi için kullandığını, ayrıca LCA sonuçlarının çevre etiketi için bilgi sağlama ve çevresel yönetim ve denetim sisteminin bir parçası olarak sürekli gelişimin ispatlanması için kullanılabilir olacağını; devletlerin, LCA'yı politik karar verme konusu içinde ve ayrıca sürdürülebilir tedarikteki tüketici rolü ile kullanabileceğini (örneğin geri dönüşüm veya yapı teknolojileri ve malzemeleri için para yardımı kararı için LCA sonuçlarının kullanılabilirliği); tüketici organizasyonların ve çevresel grupların, LCA bilgilerini birçok ülkede çevre etiket ölçütlerini oluşturmak için kullandığını; tüketicilerin ise LCA çalışmalarının “son kullanıcıları” olduğunu ve satın alma kararında sonuçlardan yararlandığını ifade etmektedir (Çamur, 2010).

Farklı kullanıcıların yararlandığı ve birçok uygulama alanını destekleyen LCA, birçok avantaja sahip olmakla birlikte sınırlılıklara da sahiptir.

LCA'nın özellikle kullanıldığı alanlardan biri de kamu ve özel sektördeki yeşil satın alma uygulamalarıdır. Mevcut alternatifler üzerinde LCA araştırması yapılarak, bu tür bir satın alma uygulaması, doğal kaynakların kullanımı ve çevresel etki dikkate alınarak gerçekleştirilebilmektedir (Demirer, 2011a).

2.11.1. Çevre etiketi (eco-label)

Çevre etiketi, 23 Mart 1992 tarihinde Avrupa Konseyi tarafından 2000 yılında güncellenen "EEC No: 880/92 Tüzüğü" olarak oluşturulmuştur. Gerekli çevre etiketine uygunluk; belirli ekolojik standartları karşılayan aynı ürün grubundaki ürünlere verilebilmektedir. Standartlar, ürün grubu tarafından yönetmeliklerle belirlenen prosedürlere uygun olarak belirlenmekte ve LCA yöntemi kullanılarak ürün yaşam döngüsündeki tüm farklı süreçlerle ilgili tüm çevresel etkileri dikkate alınmaktadır.

LCA, aynı ürün grubundaki farklı ürünlerin olası çevresel etkilerini sistematik olarak karşılaştırmayı amaçlar ve çevre etiketlerinin tasarlanması ve ekolojik standartların belirlenmesi için bilimsel temeli oluşturmaktadır (Çamur, 2010).

Çevre etiketinin amaçları; çevreyi korumak, çevresel yeniliği desteklemek ve bina kullanıcılarının çevre sorunlarına ilişkin farkındalığını geliştirmek olarak söylenebilir. Etiketler, zorunlu uygulamadan ziyade güvenilirlik, kolay anlaşılır, seçici, güncel, çok standartlı yaklaşım, Avrupa boyutu ile karakterize edilebilir olmasıdır (Çamur, 2010).

Çevre etiketi uygulamasında, ekolojik ve performans standartlarını tam olarak karşılayan ürünlere "çiçek" logosu yapıştırılmaktadır. Bu logo, tüketicilere ürünün üstün çevresel performansa sahip olduğunu göstermek için üye ülkelerde farklı ürün gruplarında kullanılmaktadır.

Ayrıca buna bağlı olarak çevre etiketli ürünlerin marka imajı tanınarak geliştirilmiş, tasarımcıların ve kullanıcıların bu ürünleri tercih etme oranı artmıştır. AB çevre etiketli ürünler; temizlik ürünleri, elektrikli ev aletleri, kağıt ürünleri, evler ve bahçeler, giyim ve turizm yapıları gibi sıralabilmektedir.



Şekil 2.17. Eco-Label Logoları (Demirer, 2011a)

Eko-etiketler (çevre dostu ürünler için sertifikalı etiketler), tüketicilerin satın alacakları ürünleri seçerken doğal kaynakların kullanımını ve çevresel etkileri dikkate almalarına olanak tanımaktadır. Bu işaretleme de LCA yöntemi ile yapılmaktadır. Almanya’da kullanılan “Blue Angel” ve İskandinav ülkelerinde kullanılan “Green Swan” örnek olarak verilebilir (Demirer, 2011a).



Şekil 2.18. Blue Angel Etiketi (Ecolabelindex, 2020; Demirer, 2011a)

Eko-tasarım olarak da bilinen çevreye duyarlı ürün tasarımı, LCA'nın bir diğer uygulama alanıdır. Eko-tasarım araştırmalarında, LCA genellikle şirket içinde geliştirme için düşünülen ürünler veya ürün bileşenleri için kullanılmaktadır (Demirer, 2011a).

LCA, ürünler ve süreçlerle ilgili yukarıda belirtilen alanlarda ve daha genel araştırmalarda doğrudan kullanılabilir. Ürün ve hizmetlerin tedarik sürecinin tasarlanması, iyileştirilmesi ve optimizasyonu ile üretim ve tüketim alanlarında kamu politikalarının oluşturulması gibi iş geliştirme stratejileri bu kapsamda değerlendirilebilir. Aşağıda bu tür kullanımlara örnekler verilmiştir:

- Çeşitli ambalaj alternatiflerinin AB Ambalaj Direktifine uygun olup olmadığını değerlendirilmesi,
- Belediyenin farklı atık yönetim yöntemlerini değerlendirip kendilerine uygun olanı seçmeleri,
- Spesifik kullanımlar (elektrik üretimi gibi) için farklı biyokütle türlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi ve çevresel avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi
- Yapılması planlanan kamu yatırımına yönelik kararların verilebilmesi amacıyla seçenekler arasında stratejik karşılaştırma yapılması.
- İnşaat sektörünü çevreye uyumlu hale getirilmesi. Örneğin, LCA çalışmaları Hollanda'da inşa edilen yeni binalarda kullanılan malzemelerin sadece enerji açısından verimli olmadığını aynı zamanda çevresel emisyon standartlarını da karşıladığını göstermesi zorunludur (Demirer, 2011a).

2.11.2. Karbon ayak izi

Karbon ayak izi, insan faaliyetlerinin çevreye verdiği zararın bir ölçüsüdür, üretilen sera gazı miktarı ile ölçülür ve birimi karbondioksittir. Doğrudan ayak izi ve dolaylı ayak izi olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Birincil ayak izi, evsel enerji tüketimi ve ulaşım (arabalar ve uçaklar gibi) dahil olmak üzere fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan doğrudan CO₂ emisyonlarının bir ölçümüyken, ikincil ayak izi, kullandığımız ürünlerin yaşam döngüsü boyunca dolaylı CO₂ emisyonlarının bir ölçümüdür.

Çok fazla tüketip çok az üretmekteyiz, bu da dünyanın ekolojik dengesini bozmaktadır. Tüketim alışkanlıklarımız, üretim yöntemlerimiz ve doğaya saygımız bu dengeyi etkilemektedir. Fosil yakıtlara bağımlılık ve kaynakların kötüye kullanılması, çevresel faktörlerin olumsuz etkilenmesine yol açmakta ve bu da iklim değişikliği, kuraklık ve kıtlık gibi küresel felaketleri tetiklemektedir (Kaplan, 2011).

İklim değişikliği, bugün ve gelecek nesiller için hayatımızın tüm yönlerini etkileyen küresel ölçekte en büyük sorunlardan biri olarak kabul edilmektedir. İklim değişikliği ile ilgili küresel araştırmalar 1979'da başlamış ve 2010'da Meksika-Cancun zirvesine ulaşmıştır. Atılan en önemli adım 1997 Kyoto Protokolü olmuştur. Kyoto Protokolü,

üreticileri bir bedel ödemeye zorlayarak zehirli gazları azaltmayı amaçlamaktadır (Kaplan, 2011).

Piyasalar, emisyon ticaret sistemleri ve proje tabanlı mekanizmalar aracılığıyla emisyon azaltma fırsatlarının, yeni yeteneklerin, hizmetlerin ve istihdamın geliştirilmesine öncülük etmek için iklim değişikliği konusunda farkındalığı artırmayı ve böylece düşük karbonlu bir ekonomiye geçişi hızlandırmayı amaçlamaktadır (Kaplan, 2011).

2.12. LCA Yaklaşımının Kısıtları

Farklı yaşam döngülerinin genel yapısını kapsayan LCA'nın en avantajlı yönü olarak söylenebilmektedir fakat bu yöntemin gerektirdiği büyük miktarda veriye dayalı olarak değerlendirildiğinde dezavantaj olarak da değerlendirilebilir.

Bu çerçevede, bir ürün veya sürecin tüm yaşam döngüsünü yalnızca belirli basitleştirmeler kontrol edilebilmektedir (Demirer, 2011a).

LCA, yerel çevresel etkiyi belirlemek için uygun bir araç değildir. LCA'ya göre, söz konusu ürün veya sürecin yaşam döngüsü, sistem sınırları ve işlevsel birimleri ve belirli etki kategorilerinin çevresel etkisi belirlenebilir. Ayrıca, LCA işlemi dinamik sistemler için değil, kararlı durum sistemleri için uygundur. Diğer bir deyişle, zaman içinde önemli ölçüde değişen sistemler üzerinde LCA çalışmaları yapılamaz (Demirer, 2011a).

Yukarıda bahsedildiği gibi, birçok ülke LCA veritabanları oluşturmakta ve en önemli sınırlamalardan biri olan veri eksikliğini ortadan kaldırmak için bunları standart bir formata sokmaya çalışmaktadır. Tüm bunlara ek olarak, LCA araştırması için gerekli tüm veriler elde edilirken bu verilerin temsil edilebilirliği ve miktarı da dikkate alınması gereken hususlardır. Ayrıca, daha önceki araştırmalar sonucunda elde edilen veriler genellikle tüm spesifik faaliyetler (elektrik üretimi, alüminyum üretimi gibi) için belirlenir ve bu üretim süreçlerinin bireysel bileşenleri için kullanılamamaktadır (Demirer, 2011a).

Bir analiz aracı olarak LCA, çeşitli karar verme süreçlerine önemli destek sağlar, ancak kendi başına bir karar verme mekanizması değildir. LCA yönteminden de anlaşılacağı

gibi, çalışmanın sonuçları kullanılan verinin nitelik ve niceliğine veya tercihlere ve varsayımlara bağlı olarak değişebilmektedir. Bu çerçevede LCA araştırmasına dayalı kararlar bu olası farklılıkları da içerecektir. Dolayısıyla LCA, mutlak ve değişmez gerçekleri yansıtmak zorunda olmayan bir karar, destek mekanizmasıdır (Demirer, 2011a).

2.13. Yaşam Döngüsü Analizi Çalışmalarında Kullanılan Yazılımlar

LCA'nın çeşitli aşamaları için birçok yazılım ve veri tabanı geliştirilmiştir. Kullanılan yazılım ve veri tabanlarından örnekler:

- ✚ **TRACI:** Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı'nın geliştirmiş olduğu etki değerlendirme metodolojisidir.
- ✚ **The Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME):** APME, belli sektörlerde yıllık olarak plastik tüketimi ve geri dönüşümü verileri yayınlamaktadır.
- ✚ **The Impact Estimator for Buildings:** Mimarlar, mühendisler ve araştırmacıların yeni bina ve tamirat faaliyetlerinin çevresel etkisini tahmin etmelerinde kullanabilecekleri bir uygulamadır.
- ✚ **BEES 3.0:** Yapı malzemelerini çevresel ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi için kullanılan yazılımdır.
- ✚ **Ecoinvent:** LCA analizinde kullanılan envanter veri tabanıdır.
- ✚ **ECO-it 1.3:** Ürün çevresel yükünün hangi aşamada daha yüksek olduğunu hesaplayan bir yazılımdır.
- ✚ **EcoScan 3.0:** Ürünlerin çevresel etkisi ve maliyetini hesaplamada kullanılan yazılımdır. Eko Tasarımda kullanılmaktadır.
- ✚ **Economic Input-Output Life Cycle Assessment:** ABD'de elde edilen belirli bir kazanç başına ortalama çevresel etkiyi hesaplayan bir yazılımdır.
- ✚ **GaBi 4 Software System and Databases:** Ürünlerin, proseslerin ve teknolojilerin çevresel, mali ve sosyal yönden LCA analizlerinde kullanılan ve aynı zamanda kendi veri tabanı bulunan yazılımdır.

- ✚ **GREET Model:** Araştırmacılar motorların ve farklı yakıt kombinasyonlarının sera gazı salınımını, emisyonların ve enerji kullanımını değerlendirdikleri bir araçtır.
- ✚ **IDEMAT 2005:** Tasarım aşamasında materyal seçiminde kullanılan bir araçtır. Materyaller, prosesler ve bileşenlerinin teknik bilgilerini içeren veri tabanı kullanılır.
- ✚ **IVAM LCA Data 4.0:** Farklı sektörlerde LCA için kapsamlı veri içeren veri tabanıdır.
- ✚ **KCL-ECO 4.0:** Komplike LCA analizlerinde kullanılan, allocation, etki değerlendirmesi modülleri ve grafik araçları içeren bir araçtır.
- ✚ **LCAPIX:** Çevresel ve mali açıdan kantitatif ölçüm imkanı sağlayan bir LCA aracıdır.
- ✚ **Life-Cycle Inventory Database:** Yakıt üretimi, yanması, elektrik üretimi ve dönüşüm prosesleri gibi genel anlamda verilerin yer aldığı bir LCA veri tabanıdır.
- ✚ **REGIS:** ISO 14031'e göre kurumsal çevresel performansın dengelenmesinde ve geliştirilmesinde kullanılan bir yazılımdır.
- ✚ **SimaPro:** Kompleks analizlerin gerçekleştirilebildiği, veri tabanı ve değerlendirme metotlarını da içeren kapsamlı bir LCA yazılımıdır.
- ✚ **SPINE@CPM:** Her tip nakliye taşımacılığı, enerji kaynaklarının üretimi, materyal üretimi, atık yönetimi alternatifleri gibi detaylı verileri içeren bir veri tabanıdır.
- ✚ **SPOLD Data Exchange Software:** SPOLT 99 formatında veri dönüşümünü sağlayan bir yazılımdır.
- ✚ **Umberto:** enerji ve materyal akışlarının şematize edildiği, verilerin farklı kaynaklardan veya doğrudan modellendiği ve hesaplandığı bir sistemdir (Curran, 2006).

Bu yazılımlarının tekstil endüstrisindeki uygulaması;

- Tekstil zinciri
- Elyaf üretimi (fabrika öncesi)
- Kumaş ve nihai ürünlerin üretimi (yerinde)

- Nihai ürünün ambalajlanması (yerinde)
- Ürünün satıcıya teslim edilmesi (fabrikadan sonra)
- Tüketicinin tekstil kullanımı (tesisten sonra)
- Ürün yaşam döngüsünün sonu (fabrika sonrası) gibi parçalar için kullanılabilmesi beyan edilmiştir.

EcoTool’da aşağıdaki etkiler hesaplanmaktadır;

- Enerji tüketimi
- İklim etkisi (CO2 eşdeğeri emisyonlar)
- Su kullanımı
- Kimyasal kullanım
- Arazi kullanımı (Luiken ve diğerleri, 2013)

2.14. LCA için Farklı Sektörlerden Örnekler

Sürdürülebilirlik çerçevesinde yürütülen LCA araştırması, şirketin kaynak, enerji verimliliği ve çevresel performansını iyileştirmiştir. Şirketler, çevreye olan etkisini en aza indirmek ve böylece maliyete dayalı riskleri azaltmak için çaba göstermektedirler (Butekom, 2014).

Yaşam döngüsü analizinin değerlendirilmesi ortaya ilk çıktığı zamanlarda daha çok tekstil dışındaki diğer sektörlerde gelişme göstermiştir. Fakat tekstil, yaşam döngüsü değerlendirmesinde diğer sektörlerle oranla etki alanının daha geniş olduğu düşünülmektedir. Günümüzde tekstil sektöründe çevresel parametreler çok önemlidir. Bu konuda tekstil işletmelerinde kullanılan kimyasallar, su kullanımı, kullanılan enerji sarfiyatı kontrol edilmiştir. Farklı alanlarda ise örneğin bina yapısının yalıtım öncesi ve sonrası ekolojik ve çevreye etkileri incelenmiştir.

Yurtdışındaki örneklere bakılacak olursa, tekstil dışındaki ürünler anlamında çok sayıda çalışma yapıldığı, özellikle karbon ayak izinin bulunması yaşam döngüsünün yapılması ve bir takım maliyet analizindeki bilgilerin kullanılması gibi çalışmaların bulunduğunu görüyoruz. Türkiye’deki çalışmalarda genellikle çevresel faktörler açısından etkilerin

daha çok değerlendirildiği, bu konudaki incelemelerin daha çok evre mühendisleri ve araştırmacıları tarafından yapıldığı, daha çok lisansüstü tez çalışmalarının yürütüldüğü dikkat çekmektedir.

Chen, Ji, Chu, Xu ve Wang (2021) Yaptıkları çalışmada, pamuklu bir tekstil malzemesinin yaşam döngüsü analizini araştırmışlardır. Geleneksel pamuğa kıyasla eko-ürünlerin veya stratejilerin çevresel etkileri ne ölçüde azaltabileceğini göz önünde bulunduran pamuk liflerinin ve tekstil ürünlerinin çevresel yüküne ilişkin LCA araştırma bulgularını gözden geirmışlerdir. Pamuk yetiştiriciliğinin su, gübre ve pestisit kullanımı nedeniyle pamuğun çevresel yüküne önemli ölçüde katkıda bulunduğu sonucuna varılabildiğini göstermişlerdir.

Ayrıca, organik pamuğun yetiştirilmesi, pamuk lifinin çevresel yükünü önemli ölçüde azaltabileceğini belirtmişlerdir. Üretim aşamasında su, enerji ve kimyasalların kullanımı genel olarak yüksektir. Çevresel yükü azaltan alternatif kimyasallar teşvik edilmesi gerektiğini anlatmışlardır. Ayrıca kullanım aşamasının küresel ısınmaya ve su kıtlığına önemli katkısı nedeniyle temiz tüketim, temiz üretimden daha önemli olduğunu vurgulamışlardır (Chen ve diğerleri, 2021).

Uygulanan ve yeni CE stratejilerinin getirdiği belirsizlikle başa çıkabilmek için dairesel ürün sistemlerinin çevresel etkilerini doğrusal bir ürün sistemine kıyasla değerlendirmek için sağlam ve bilime dayalı bir yöntem gereklidir. LCA yöntemi bu ihtiyaçları şu yollarla karşılayabilir:

- 1- Çeşitli evresel etkilerin nicelleştirilmesi;
- 2- Tüm yaşam döngüsünü dikkate alarak;
- 3- Yüksek bilimsel standartlara güvenmek;
- 4- şeffaf olmak ve bilim tarafından kabul görmek.

Tekstil geri dönüşümüne ilişkin bazı LCA alışmaları halihazırda yayınlanmıştır. Ancak çalışmaların çoğu, başta “iklim değişikliği” ve “enerji kullanımı” olmak üzere yalnızca bir veya iki göstergeye odaklanmaktadır. Bu çalışmalardan sadece birkaçı daha geniş bir çevresel etki grubunu ele almaktadır. Ayrıca çoğu çalışma, geri dönüşüme gönderilen

tekstil atıklarının çevresel yüklerden arınmış olduğunu düşünmektedir. Bununla birlikte, tekstiller hala daha fazla işlem gerektiren güçlü toksik maddeleri tutabilir. Ek olarak, bu çalışmalar yaşam sonu yakma veya depolamaya karşı geri dönüşüm/yeniden kullanıma odaklanmaktadır.

Bilindiği kadarıyla, şimdiye kadar doğrusal ve dairesel bir tekstil ürün sisteminin tüm yaşam döngüsünü karşılaştıran hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu boşluğu doldurmak için Braun ve arkadaşlarının (2021) yaptığı bu çalışma, poliesterden (PES) yapılmış Wear2wear™ fonksiyonel iş giysisi ceketini kullanarak doğrusaldan dairesel bir ürün sistemine geçişin çevresel sonuçlarını karşılaştırmaktadır. On bir farklı etki kategorisi göz önünde bulundurularak atık tahsisi çevresel yükten muaf tutulmamıştır (Braun ve diğerleri, 2021).

Yukarıda bahsi geçen Wear2wear™, sürdürülebilir ve çevre dostu iş uygulamalarına bağlı şirketlerin yenilikçi bir ortaklığıdır.

Firmaların her biri tekstil geri dönüşüm sürecinin belirli bir aşamasında katkısını sunmaktadır. Sürdürülebilir Wear2wear™ konsepti, yüksek kaliteli kıyafetlerle eşanlamlıdır. Avrupa'dan son teknoloji üretim tesislerinde kullanılmış tekstillerden yeni fonksiyonel tekstiller üretilmektedir. Uygulama alanına bağlı olarak fonksiyonel tekstiller su geçirmezlik, nefes alabilirlik, koruma ve konfor gibi yüksek standartları ve gereksinimleri karşılamaktadır. Hammadde döngüsünün tekrar kapanması için, bu tekstiller yaşam döngülerinin sonunda tekrar tamamen geri dönüştürülebilir. Avantajı atık yoktur, tekstiller hala yeni, ileri dönüşüm giysiler üretmek için kullanılabilirler (Anonim, 2021).

Yapılan bir diğer çalışmada, yaşam döngüsü değerlendirme metodolojisi kullanılarak pamuklu, yünlü ve poliester giysilerin tekstil tedarik zincirinin çevresel etkisi araştırılmıştır. Bu değerlendirme için çevresel etki kategorisi olan iklim değişikliği kullanılmıştır. Bu çalışma, iklim değişikliğine ana katkının pamuklu ve poliester giyim için tüketici kullanım aşaması olduğunu, yün giyim üretim sürecinin ise tüketici kullanım

aşamasından daha fazla etkiye katkıda bulunduğunu göstermektedir (Moazzem ve diğerleri, 2018).

Moazzem ve diğerleri (2018) Tarafından yapılan bu çalışmada, Avustralya'da en çok tüketilen pamuk, poliester ve yün ile üretilen üç giysi, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) metodolojisi kullanılarak modellenmiş ve bu modelin sonuçları, bu üç elyafın Avustralya'daki tüketiminin mevcut senaryosuna dayalı olarak ölçeklendirilmiştir. Yapılan bu çalışma, giyim tüketiminden kaynaklanan potansiyel etki azaltma senaryosunu belirlemek için üç giysinin bir LCA modelini oluşturmayı amaçlamaktadır. LCA modeli, hammadde çıkarılmasından yaşam süresinin sonuna kadar bu giysilerin bir tedarik zinciri modeli geliştirilerek yapılmıştır (Moazzem ve diğerleri, 2018).

Piontek ve Müller (2018) Moda endüstrisinde sürdürülebilirliğe odaklanan bir araştırma projesinin bir parçası olarak, tekstil ürünlerinin değer zincirine odaklanan ve örneğin inşaat malzemelerinde tekstil liflerinin kullanımını ihmal eden, giysi, kumaş, elyaf ve benzeri ürünler gibi ara ürünlere odaklanmaktadır (Piontek ve Müller, 2018). Kullanılan kimyasalların toksisite etkileri, tekstil ürünlerine ilişkin LCA çalışmalarında yalnızca küçük bir ölçüde ele alınmıştır. Bu etkileri hariç tutmanın iki ana nedeni vardır; (1) tekstille ilgili kimyasalların kullanımı ve (2) emisyonlarına ilişkin yaşam döngüsü envanteri (LCI) verilerinin olmaması. Ross ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bu verileri elde etmeye çalışmışlardır (Roos, Jönsson, Posner, Arvidsson ve Svanström, 2019).

Pamuklu tekstillerin renk soyulması için geleneksel alkali indirgeyici işleme karşı, tekstillerin renk giderimi için ozon destekli işlemler gibi ekoteknolojilerin kullanımına ilişkin araştırma yaklaşımları araştırılmaktadır. Çevresel etkileri değerlendirmek için bu ekoteknolojilerin değerlendirilmesi yapılmalıdır. Powar, Perwuelz, Behary, Hoang, Aussenac, Loghin ve Chen (2021) Reaktif boyalı pamuklu tekstillerin ozon bazlı renk giderme sürecini incelemek için kısmi “kapıdan kapıya” LCA uygulamışlardır. Ozonlama işlemi kullanılarak reaktif boyalı pamuklu tekstillerin renk giderme işlemi için girdi ve çıktı veri akışlarını belirlemek için deneyler yapmışlardır.

Çalışmanın amacı, ozon sıyırma işleminin çevresel etkisine katkıda bulunan ana faktörleri vurgulamak ve ardından reaktif boyalı renk açma için en iyi koşulları yaratmaktır. Ayrıca

bu çalışma, kullanılan ozonlama prosesinin potansiyel etkisini belirlemeyi ve değerlendirmeyi amaçlamakta ve ayrıca prosesin sürdürülebilirlik profilini de teşvik etmektedir (Powar ve diğerleri, 2021).

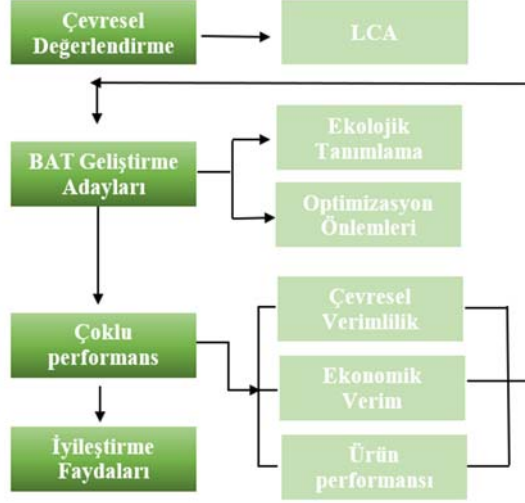
Tekstil endüstrisinin yüksek çevresel etkisi vardır, önemli miktarda endüstriyel su tahliye eder, yüksek düzeyde enerji tüketir ve çok miktarda hava kirleticisi yaymaktadır.

Zhang ve diğerleri (2018) Sürdürülebilir üretim gereksinimini karşılamak için, üretim sürecinin çevresel etkilerini azaltmak için mevcut bir poliester-pamuk üretim sistemi için yaşam döngüsü değerlendirmesine dayalı sistem odaklı iyileştirilmiş bir tasarım çerçevesi oluşturmuşlardır.

LCA, mevcut en iyi teknoloji (Best Available Technology - BAT) geliştirme adaylarını belirlemek için kullanılmıştır. BAT'ların çevresel, ekonomik ve ürün performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. LCA, poliester-pamuk üretiminin denizlerdeki sucül ekotoksiste potansiyeli, küresel ısınma potansiyeli ve abiyotik tükenme üzerinde en büyük çevresel etkileri uyguladığını belirlemiştir. Üretim sürecinin baskı ve boyama aşamaları çevreye en çok zarar veren aşamalar olduğu görülmüştür (Zhang ve diğerleri, 2018).

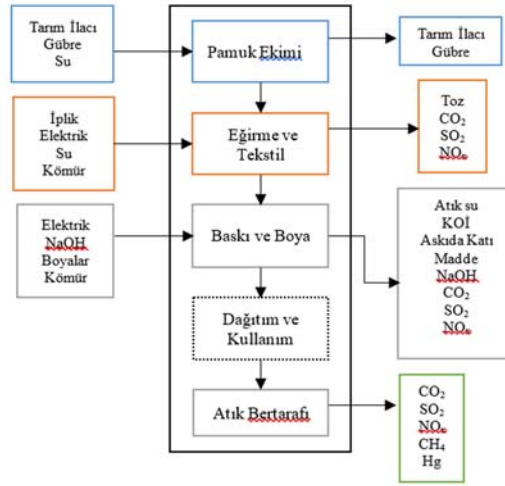
Zhang ve diğerleri (2018) Üç aşamalı bir süreç kullanarak, çevresel etkileri en aza indirmek için yeni teknolojilerin geliştirilmesine odaklanılacak alanları belirlemek için poliester-pamuk üretim sürecinin en kirletici aşamaları için iyileştirilmiş bir tasarım çerçevesi oluşturmuşlardır. İlk adım olarak, pamuk ekiminden atık bertarafına kadar tüm üretim sisteminin çevresel performansını belirlemek ve ölçmek için bir çevresel LCA gerçekleştirmek ardından, çevresel iyileştirme ve dolayısıyla en büyük çevresel etkilerin nedenlerine dayalı olarak yeni önerilen BAT'lerin geliştirilmesi için en büyük fırsatı gösteren poliester-pamuk üretiminin kilit aşamalarını belirlemek için LCA sonuçlarını kullanmışlardır. Son olarak, geliştirilmiş tasarımın entegre faydaları, kaynak tükenmesi, ekolojik etki ve insan sağlığının nicel çevresel etki değerlerinin değerlendirilmesiyle BAT'lerin çevresel faydalarının değerlendirildiği çoklu performans analizi kullanılarak belirlenmiştir.

Ekonomik faydaları tahmin etmek için yatırım için harcanan toplam sermayenin ne kadar sürede geri alınabileceği, net bugünkü değer ve iç verim oranı değerleri kullanılmış ve ürün performansı niteliksel olarak analiz edilmiştir (Zhang ve diğerleri, 2018).

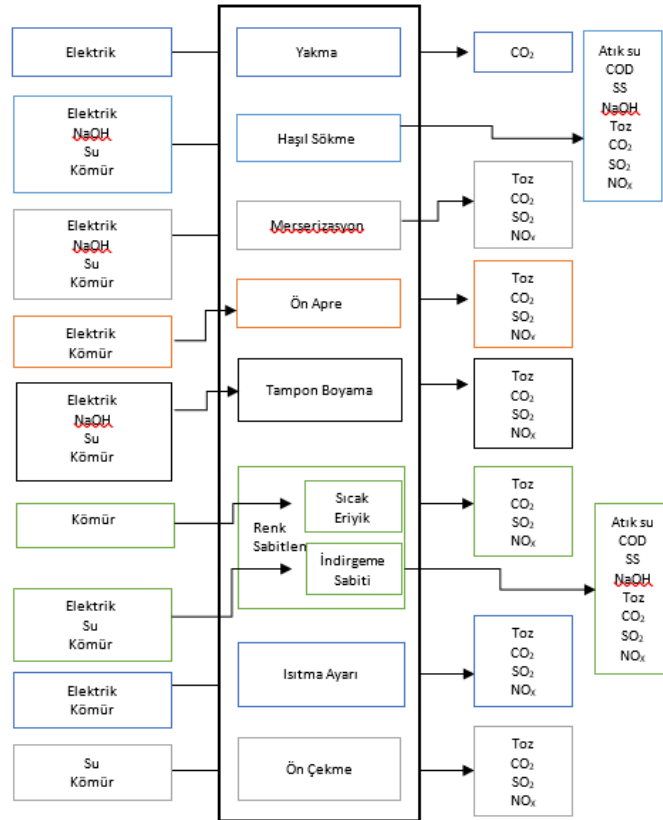


Şekil 2.19. Poliester-pamuk üretim süreci için geliştirilmiş tasarım çerçevesi (Zhang ve diğerleri 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

Çevresel iyileştirme için en büyük fırsatı sunan poliester pamuk üretiminin çevresel etki kategorileri ve aşamaları, hammaddeden, üretime ve nihai bertarafa kadar LCA kullanılarak tanımlanmış ve ölçülmüştür. Ana adımlar, ISO 14040:2006 ve 14044:2006 (ISO 2006a,b) LCA çerçevesine göre LCA'nın kapsamını tanımlamayı, envanter analizini, etki değerlendirmesini ve yorumlamayı içermektedir. LCA'nın kapsamı, üretimin beş aşamasından dördünü kapsamaktadır: pamuk ekimi, eğirme ve tekstil, baskı-boyama ve atık bertarafı. Dağıtım ve kullanım aşamasında, çevresel etkilerin derecesi, tüketici davranışına ve ulaşım modu seçimine bağlıdır; bu nedenle, bu çalışmanın amacı üretim sürecini optimize etmek olduğundan, dağıtım ve kullanım aşaması LCA'ya dahil edilmemiştir (Zhang ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.20. Poliester-pamuk üretim sürecinin sistem sınırları (Zhang ve diğerleri 2018'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.21. Poliester-pamuk üretim sürecinde baskı ve boyama aşamasının sistem sınırları (Zhang ve diğerleri 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

Baydar, Ciliz ve Mammadov (2007) araştırmalarında, geleneksel tişört üretimini çevresel etkisini üç farklı ekolojik pamuklu tişörtle karşılaştırmışlardır. Bu kapsamda seçilen pamuklu tişörtlerin potansiyel çevresel etkisi, pamuk ekim ve hasadı, hammadde temini, çırçır, eğirme, ıslak kumaş işleme ve terbiye, kullanım ve bertaraf aşamaları olarak hesaplanmıştır. Sürdürülebilir tarım yöntemleri ve ekolojik olarak verimli boyama tarifleri dikkate alınarak ürünler karşılaştırılmıştır. Konvansiyonel ve ekolojik tişörtlerin kimyasal, enerji ve su tüketim değerleri Çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Geleneksel tişört ve eko tişörtün kimyasal, enerji ve su tüketim değerleri (Baydar ve diğerleri, 2017)

Proses	Alt Proses	Kimyasal Tüketim (kg/kg tekstil)		Enerji Tüketimi (MJ/kg tekstil)		Su Tüketimi (L/kg tekstil)	
		I	II	I	II	I	II
Hazırlama	Ağartma	0,118	0,023	8.34	3,21	50	50
Renklendirme	Boyama	0,95	0,95	1.86	1.86	10	10
	Yıkama	0,02	0,02	12,63	7,84	80	50
Terbiye	Yumuşatma	0,04	0,04	0,57	0,57	10	10
	Kurutma	-	-	1,80	1,80	-	-
Toplam		1,128	1,033	25,20	15,28	150	90

I: Geleneksel Tişört,

II: Eko Tişört

Araştırma sonucunda, farklı yaşam döngüsü aşamalarındaki müdahalelerin ürünün sürdürülebilirliğini iyileştirebileceğini belirlemişlerdir. Bu sonuçlar, kimyasal pestisitlere ek olarak, pamuk ekim ve hasat aşamalarında kullanılan tarım makinelerinin tükettiği mazotun da birçok çevresel etkiye neden olacağını göstermektedir.

Ürün verimliliği azaldıkça bu etkilerin arttığını gözlemlemişlerdir. Bu nedenle, tarım makinelerinde dizel yakıt yerine tarımsal atık ve biyodizel kullanımının tercih edilmesinin, biyodizelin sürdürülebilir hammaddelerden üretilmesi şartıyla teorik olarak nihai ürünün sürdürülebilirliğini artıracakı belirlenmiştir. Ayrıca, güç tüketiminin ve diğer çevresel etki kategorilerinin, özellikle kullanım aşamasında, ürünün yaşam döngüsü boyunca küresel ısınma potansiyeline çok katkıda bulunduğu keşfedilmiştir.

Araştırma sonucunda, kumaş üretim ve terbiye tesislerinde enerji verimliliğinin artırılması ve yenilenebilir kaynakların kullanılması ve ev elektriğinin ekonomik verimliliğinin sağlanması ile ekolojik tişörtlerin çevresel performansının daha da iyileştirilebileceği belirlenmiştir. T-shirt ve benzeri tekstil ürünlerinin sürdürülebilirliğini artırma başarısının insan faktörlerine bağlı olduğunu, çiftçileri organik tarıma ikna etmenin planın ilk ve en önemli görevi olduğunu açıklamışlardır (Baydar ve diğerleri, 2005).

Toksöz'ün (2018) çalışmasında tekstil sektörünün sürdürülebilirlik uygulamaları ve araçları, kumaş üretim performansı ve çevresel etkisi üzerinden incelenmiştir. Çalışma kapsamında HIGG Material Sustainability Index Life Cycle Tool aracılığıyla sadece ana girdi hammaddeleri değiştirilip diğer parametreler değiştirilmeden tutularak 4 farklı pamuklu denim dokuma kumaşın yaşam döngüsü analizi yapılmıştır. Aynı kumaş fiziksel özellikler açısından da test edilmiştir. Test edilen denimin MSI sonuçları Çizelge 2.7'de gösterilmiştir (Toksöz, 2018)

Çizelge 2.7. Denim kumaşlara ait MSI (Material Sustainable Index) sonuçları (Toksöz, 2018)

<i>Parametreler</i>	<i>Konvansiyonel Numune</i>	<i>BCI Numune</i>	<i>Organik Numune (GOTS)</i>	<i>Geri Dönüşüm Numune (GRS)</i>
<i>İklim Değişikliği MSI skoru</i>	18,35	17,01	16,94	16,16
<i>Ötrofikasyon MSI skoru</i>	26,56	29,80	20,62	17,80
<i>Su Kaynaklarının Tükenmesi / Kıtlık MSI skoru</i>	50,63	29,80	20,62	17,80
<i>Kaynakların yok edilmesi, fosiller ve mineraller MSI skoru</i>	14,41	13,41	13,48	13,18
<i>Kimyasal etki MSI skoru</i>	12,57	11,85	7,00	10,42
<i>Toplam maliyet MSI skoru</i>	112,52	73,75	66,06	59,28

Çalışmanın sonuçları, yalnızca ana hammaddelerin değiştirilmesiyle daha düşük bir ek maliyetle çok önemli bir pazar payının elde edilebileceğini göstermektedir (Toksöz, 2018).

Aydın ve Çiner (2016) araştırmalarında dünyada hızla değişen tekstil trendlerinin bu ürünlerin hızla t ketlenmesine ve  evre sorunlarının artmasına neden olduğuna dikkat çekmiştir. Bu nedenle yaşam döngüsü değerlendirmesinin bu aşamada çevresel yükü belirleme yöntemi olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmada tamamen pamuklu ev tekstili ürünleri için %100 pamuklu boyalı yatakların üretim sürecinden nihai ürünün oluşturulup kullanıcıya ulaşması ve israf edilme sürecine kadar yaşam döngüsü değerlendirmesi uygulanmıştır. Uygulamanın sonuçları, ürünün yaşam döngüsünün kullanım aşamasında  evre üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Üretim aşamasında çevreye en büyük etkisi olan boyalı çarşafların boyama ve terbiye işlemi, düz beyaz kumaşın terbiye işlemi ile karşılaştırılmıştır. Çevresel etki kategorisinde boyama işleminin zararlı etkileri belirlenmiştir (Aydın ve  iner 2016).

Esteve-Turrillas ve Guradia (2017), giyim atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş pamuk liflerini, yaşam döngüsü çevresel etkisi açısından geleneksel ve organik pamuk lifleriyle karşılaştırmıştır. Geleneksel pamuk ekiminden organik tarıma geçişin ve üretim adımlarını yeşil bir Şekilde ilerlemenin avantajları olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte, organik pamuk kullanımının sürdürülebilir olmaktan uzak ve  evre üzerinde zararlı etkileri olan bir boyama işlemi gerektirdiğini bulmuşlardır. Bunun yerine, pamuk ekimini ve çevresel yan etkileri önlemek için bir seçenek olarak geri dönüştürülmüş hammaddelerin ve renkli liflerin akıllı seçimine dayalı geri dönüşüm teknolojisinin kullanılmasını ve çevreyi etkilemek için geleneksel  ır cırılama yerine kesme/doğrama adımının etkisi ile yer değiştirebilecek bir seçenek kullanılmasını önermişlerdir. Ayrıca endüstriyel pamuk atıklarının geri dönüştürülmesinin ürün için ikinci bir yaşam sağladığını, böylece çevresel etkiyi ve bertaraf maliyetlerini azalttığını belirtmişlerdir (Esteve-Turrillas ve Guradia, 2017).

Yan, Wang, Ding, Zhang, Wu, Wang ve Zhao (2016) birçok farklı kumaş türü karbon ayak izine göre değerlendirilmiştir. Endüstriyel ölçekte en büyükten en k  ğe karbon ayak izi, y nl  kumaşlar, y n-poliester karışımlı kumaşlar ve pamuklu kumaşlar olduğunun gözlemlenmişlerdir. Pamuklu kumaşların karbon ayak izinin temel nedenleri hammaddeler, üretim süreçleri ve renklerdir.

Pamuk/poliester karışımı kumaşın karbon ayak izinin saf pamuklu kumaşa göre daha yüksek olduğu, süprem kumaşın ribanalı kumaştan, koyu renkli kumaşın karbon ayak izinin açık renkli kumaşa göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Tekstil kumaşlarının üretim sürecinde, dolaylı sera gazı ve elektrik emisyonlarının, kömür ve petrolün doğrudan yanmasından kaynaklanan emisyonlardan çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Yan ve diğerleri, 2016).

Alper (2015), Aydın, Adana, Antalya, Diyarbakır, İzmir ve Şanlıurfa illerinin su ayak izini hesaplamak için Cropwat pamuk analiz programını kullanmıştır. Bu çalışmada, "Better Cotton Practice" (BCI) uygulamasının pamuk tarlalarında su tüketimini azaltmaya yönelik bir uygulama olduğunu vurgulamışlardır. İyi pamuk uygulamaları ile pamuk üretimi %23'e varan su tasarrufu sağlayabilmektedir. Araştırma sonuçları Better Cotton Initiative'in üreticilere daha iyi pamuk üretim fırsatları sunmayı, sektörün güvenliğini artırmayı, sosyal ve olumsuz çevresel etkileri azaltmayı amaçlayan çok paydaşlı uluslararası bir organizasyon olduğunu göstermektedir (Alper, 2015).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Çalışmanın Kapsamı

Çalışmanın kapsamı, iki farklı boyama yönteminin kapıdan kapıya çevresel karşılaştırması olarak belirlenmiştir.

Susuz boyama prosesi belirlenirken literatür kısmında olmayan ön yıkama adımı eklenmiştir. Susuz boyamada kumaşın taşıdığı safsızlıklar boyama prosesini bozup lekeleme yapabildiği için ön yıkama gerekebilmektedir. Bu çalışmada susuz boyama öncesi ön yıkama olduğu varsayılmış ve hesaplamalar bu varsayımlara göre yapılmıştır. Firmadan alınan bilgiye göre kullanılan su miktarı 1:8 oranında hesaplanmıştır.

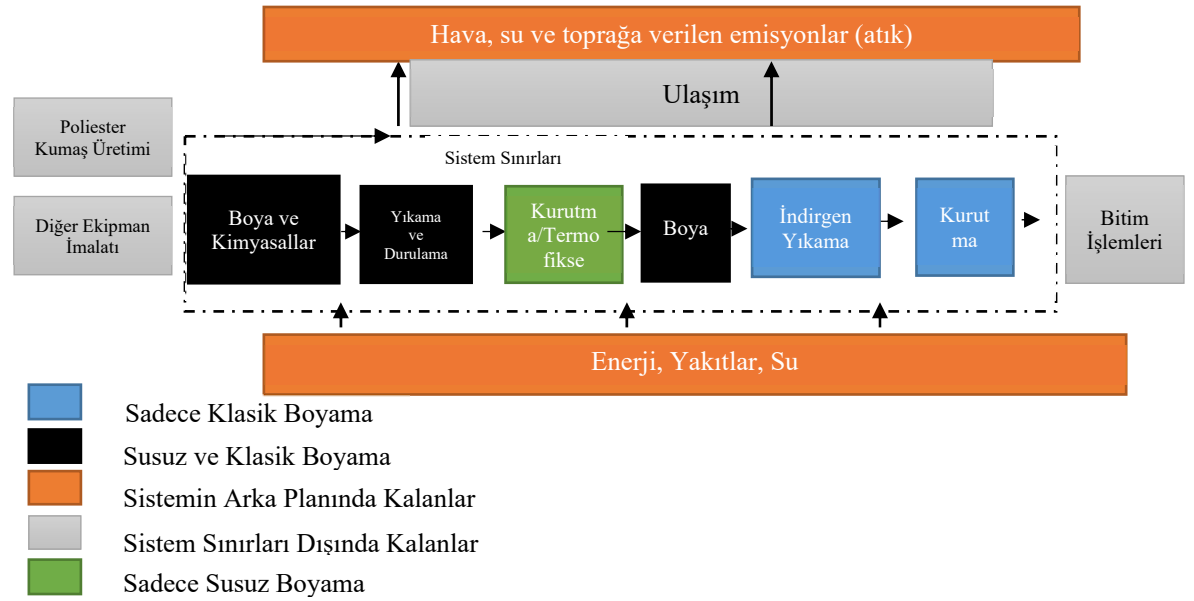
3.1.1. Sistem sınırları

LCA'nın bir parçası olarak incelenen sistem sınırları, boyaların ve kimyasal malzemelerin çıkarılması ve işlenmesi, işleme için elektrik ve ısı üretimi ve Şekil 3.1'de gösterildiği gibi süreçten kaynaklanan emisyonları içerir. Kumaşın üretimi, terbiye işlemleri ve nakliye gibi diğer kalemler, karşılaştırılan tüm sistemler için eşit oldukları varsayımıyla hariç tutulmuştur.

Aşağıdaki Şekil 3.1 ve Çizelge 3.1, hem klasik boyama hem de susuz boyama teknolojileri için dahil edilen ve hariç tutulan sistem sınırlarını göstermektedir.

Çizelge 3.1. Sistem sınırlarının özeti (Jewell, 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Sistem Sınırına Dahil Edilenler	Sistem Sınırından Hariç Tutulanlar
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Boya hammaddeleri ✓ Enerji üretimi ✓ Boyama işlemi ✓ Yıkama ve Durulama işlemi ✓ İndirgen yıkama (sadece klasik boyama) ✓ Kurutma 	<ul style="list-style-type: none"> x Kumaş üretimi x Terbiye ve diğer boyama sonrası işlemler x Kurutma ve Dolgu işlemi x Diğer ekipman imalatı x Hammadde ve bitmiş ürünlerin taşınması x Destek ekipmanının bakımı ve çalıştırılması x Çalışan işe gidiş geliş x Üretim tesislerinin genel giderleri (ısıtma, aydınlatma) x Ürünlerin ambalajlanması x Depolama x Kullanım Ömrü Sonu İmhası



Şekil 3.1. Sistem sınırlarına dahil edilen ve edilmeyenler (Jewell, 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

3.1.2. Veri gereksinimleri, yazılım ve veritabanları

Yapılan çalışmada, boyama işlemleri için hammadde girdileri, proses enerjisi ve emisyonlar kategorilerde veri toplamayı içermektedir.

Susuz boyama süreci için üretim verileri, Hollanda'daki DyeCoo merkezindeki denemeler sırasında toplanmış, Tayland'daki bir pilot tesisten alınan işleme verileriyle onaylanmıştır.

Klasik boyama ile ilgili veriler ise Bursa'da faaliyet gösteren tekstil üretimine ilişkin poliester boyama yapan firmadan alınmıştır.

3.1.3. Veri hesaplama

Susuz boyama teknolojisine özgü tüm veriler, DyeCoo'dan gelen mühendislik hesaplamalarına ve makineden gelen çıktı verileriyle birlikte buhar, CO₂, pompalar ve soğutucunun fiziksel özelliklerine dayandırılmaktadır.

Basınçlandırma, boyama, durulama için elektrik, buhar ve su girdileri hesaplanmıştır. Klasik boyama teknolojisine özgü tüm veriler doğrudan firmadan gelmektedir.

3.1.4. Yaşam döngüsü etki değerlendirme metodolojisi ve değerlendirilen etki kategorileri

Aşağıdaki çevresel Etki Kategorileri ve Etki Göstergeleri değerlendirilir:

LCIA (Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi) sonuçları:

- Asitleşme Potansiyeli (AP) [kg SO₂eq];
- Ötrofikasyon Potansiyeli (EP) [kg Fosfat eq];
- Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) [kg CO₂eq];
- Ozon Tüketim Potansiyeli (ODP) [kg R11 eq];
- Foto-Oksidan Oluşturma Potansiyeli (POCP) [kg Ethene eq];
- İnsan ve Ekotoksisite* Yalnızca Kalitatif

LCI sonuçları:

- Fosil enerji kaynaklarının Birincil Enerji Talebi (PED Fosili) [MJ];

- Kullanılan Proses Suyu (litre)

[1]

GWP, AP, EP, ODP ve POCP için etki değerlendirme sonuçları, CML metodolojisi (Çevre Bilimleri Merkezi, Leiden Üniversitesi, Hollanda) kullanılarak hesaplanmıştır. PED ve Proses Suyu sonuçları doğrudan LCI'den gelmektedir herhangi bir etki değerlendirme metodolojisi gerekli değildir. CML etki karakterizasyonu, yüksek bilimsel titizliği ve orta nokta yaklaşımı nedeniyle etki değerlendirme metodolojisi uygun görülmüştür.

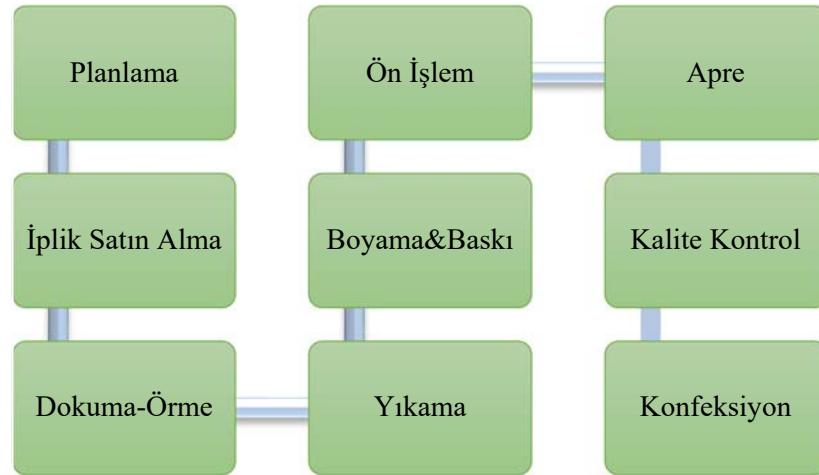
Çalışmada sadece proses suyu dikkate alınmıştır, su ayak izi bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

Su kullanımı ile tüketim (çekme ve havzadan çıkarma) arasında gerçek 'Su Ayak İzi'ni etkileyen uygun bir tanımlama bulunmamaktadır. Arka plan verilerinin tutarlılığında iyileştirmeler olmadan, tam bir su kullanımı envanteri uygunsuz sonuçlar doğuracağı düşünülmektedir.

3.2. Çalışmanın Yapıldığı Tekstil Firmasının Tanıtımı

Çalışmanın yapılacağı tekstil firması 1962 yılında Bursa'da faaliyetlerine başlamıştır. 1982 yılında boya-baskı tesisini kurmuştur. Firma toplamda 28.886 m² arazi üzerinde yalnızca boyahane ve konfeksiyon üretim alanları mevcuttur. İplik, dokuma ve örme üretim faaliyetlerini farklı bir lokasyonda sürdürmektedir. Ana üretim konusu hazır giyim olup ipliği boyalı kumaş ve spor giyim alanındaki Ar-Ge faaliyetlerinde de üretim yapmaktadır.

Jet boyama ile ilgili verileri aldığımız firmada kumaş üretimi diğer lokasyonunda gerçekleştirildikten sonra boyahaneye sevk edilmektedir. İstenilen renkte boyanan kumaşlar diğer fabrikada nihai ürüne dönüştürülerek müşteriye sevk edilmektedir. Firmaya ait tüm üretim akış şeması Şekil 3.2'deki gibidir.



Şekil 3.2. Firmaya ait üretim akış şeması

3.3. Materyaller

3.3.1. Kumaş

Fonksiyonel birim 100 kg “crepe demore” kalite poliester kumaşının boyaması olarak tanımlanmıştır. Kumaşların bitim işlemlerinin her iki işlem için de aynı olduğu varsayılmıştır.

Her iki boyama yöntemi için de işlem akışı, parti boyutu 100 kg kumaş olan bir boyama/durulama/kurutma döngüsüdür. Klasik boyama ve susuz boyama, malzeme ve enerji girdileri boya rengine bağlı olduğundan, tüm sonuçlar hem açık hem de koyu tonlar için sunulmaktadır.

Çizelge 3.2. Tez çalışmasında kullanılan kumaşın teknik özellikleri

Kumaşın Hammaddesi	%100 Poliester
Kumaşın Örgüsü	Bezayağı
Mamul Kumaşın Gramajı	65 g/m ²
Mamul Kumaşın Eni	150 cm
Kumaşın Atkı Sıklığı	32 atkı/cm
Kumaşın Çözümlü Sıklığı	34 çözgü/cm

3.3.2. Boyamada kullanılan boyarmadde ve kimyasal yardımcı malzemeler

Proseslere göre boyamada kullanılan boyarmadde ve kimyasal yardımcı malzemeler Çizelge 3.3'deki görüldüğü gibidir.

Çizelge 3.3. Klasik boyamada kullanılan boyarmadde ve kimyasal yardımcı malzemeler (Fonksiyonel birim 100 kg poliester kumaş)

<u>İşletme Prosesi</u> <u>(Klasik</u> <u>Boyama)</u>	<u>Kullanılan</u> <u>Boyarmadde ve</u> <u>Kimyasallar</u>	<u>Kimyasalların</u> <u>Açıklamaları</u>	<u>Açık Ton</u> <u>Boyamak</u> <u>İçin</u> <u>Kullanılan</u> <u>Miktar</u>	<u>Koyu Ton</u> <u>Boyamak</u> <u>İçin</u> <u>Kullanılan</u> <u>Miktar</u>
Boyarmaddeler	Coralene Blue MD	Dispers Boya	1,90 g	25,70 g
	Coralene Yellow MD	Dispers Boya	1,0 g	-
	Dianix Rubine CC	Dispers Boya	1,20 g	-
	SETAPERS RED P-BEL	Dispers Boya	-	435,90 g
	Setapers Yellow P-6G	Dispers Boya	-	841,70 g
Boyama için Kullanılan Yardımcı kimyasallar	Sirrix NE TR Liq	Nötralizasyon asidi	800 g	1600 g
	Setalan BKF New	Egalizatör/Dispergat ör	800 g	800 g
	Sodyum Hidroksit	Alkali	800 g	4000 g
	EXAPON BHL	Tampon asit	400 g	400 g
	FELOSAN ERS NEW	Islatıcı	800 g	800 g
	RUCORIT GOLD	Alkali Redüktan	-	9600 g

Çizelge 3.4. Süperkritik boyamada kullanılan boya ve kimyasallar (Fonksiyonel birim 100 kg poliester kumaş)

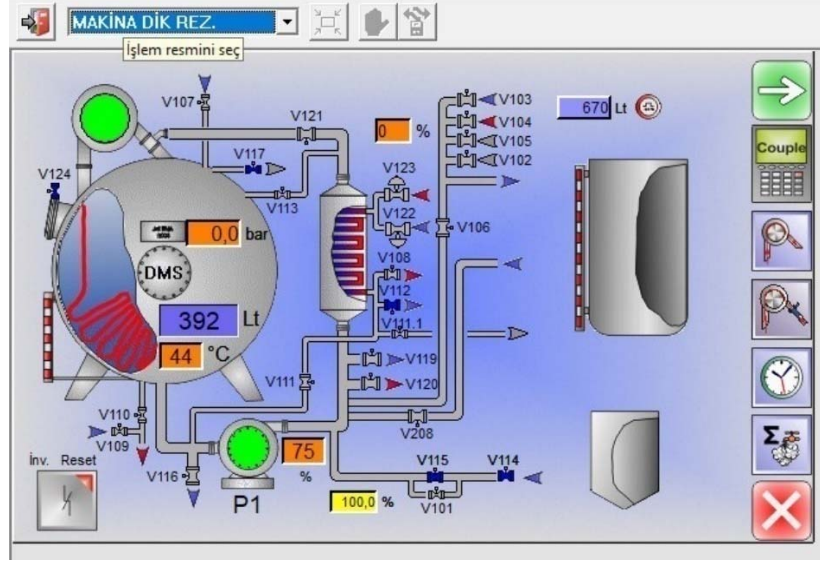
<u>Proses</u> <u>(Süperkritik</u> <u>Boyama)</u>	<u>Kullanılan</u> <u>Boyarmadde</u> <u>ve Kimyasallar</u>	<u>Kimyasalların</u> <u>Açıklamaları</u>	<u>Açık Ton</u> <u>Boyamak İçin</u> <u>Kullanılan</u> <u>Miktar</u>	<u>Koyu Ton</u> <u>Boyamak İçin</u> <u>Kullanılan</u> <u>Miktar</u>
--	---	---	--	--

Boyarmadde	Saf pigment	Dispers Boyalar	2000 g	2180 g
Boyama için Kullanılan Yardımcı kimyasallar	Deterjan	Islatıcı	800 g	800 g
	Karbondioksit	-	31660 g	31660 g

3.3.3. Makine ve metodoloji

Boyama işlemi için Dilmenler Jumbo Full Otomatik Boyama Makinesi kullanılmıştır. Makinenin kapasitesi ve ağırlığı 150 kg, hacmi 5837 lt, max tasarım sıcaklığı 135 °C, max tasarım basıncı 0,22 MPa'dır.





Şekil 3.3. Jet Boyama Makinası

Metodoloji olarak LCA envanter hesaplamalarında SimaPro 9.3 yazılımı, LCA veri tabanı olarak EcoInvent 3 kullanılmıştır.

3.4. Yöntemler

3.4.1. Susuz ve klasik boyama proses akışları

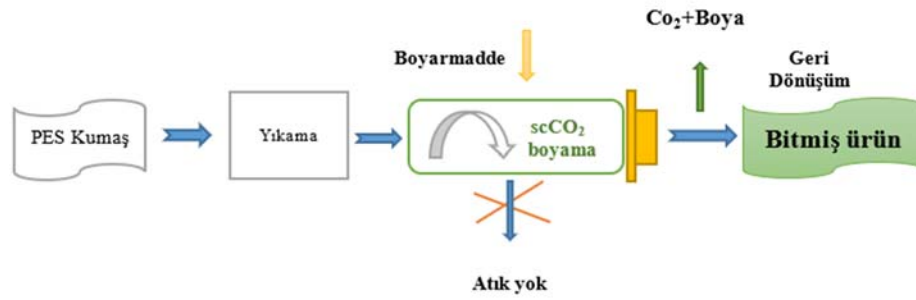
Süperkritik sıvılar, hem sıvı hem de gaz özelliklerine sahip yüksek oranda sıkıştırılmış gazlardır ve bu tekstil işleme için avantajlar sunmaktadır. Süperkritik CO₂ hem çözücü hem de çözücü görevi görebilmektedirler. Süperkritik sıvılar, sıvılardan daha yüksek difüzyon katsayılarına, daha düşük viskozitelere ve yüzey gerilimine sahiptir. Bu nedenle malzemelere daha iyi nüfuz etmektedir. Suyun scCO₂ ile değiştirilmesinin boyama endüstrisi için büyük çevresel avantajlar sunduğu düşünülmektedir. Su temini dünyanın birçok yerinde bir sorundur, atıksu ve arıtımı hem çevresel hem de ekonomik bir yükür. Sistem ayrıca boyama işlemini kısaltabilir ve genel CO₂ emisyonlarını azaltabilmektedir (Devrent ve diğerleri, 2006).

Susuz Boyama

Süperkritik karbondioksit akışkan ortamında boyama işlemi 4 adımdan oluşmaktadır. Boyama işlemi, boyanın süper kritik karbondioksitte çözülmesiyle başlar, daha sonra

boyayı ipliğe aktarır, iplik tarafından emilir ve son olarak ipliğe yayılması şeklinde ilerlemektedir (Devrent ve diğerleri, 2006). Şekil 3.4'te süperkritik ile boyama işlem adımları gösterilmektedir. Son yapılan çalışmalara göre süperkritik ile boyama öncesinde noniyonik sabun ile kumaş üzerinde kalan yağ, boya kalıntısı vb. maddeleri uzaklaştırmak için yıkama işlemi eklenmiştir.

Yapılan bu çalışmada süperkritik boyama prosesinin boyama koşulları, DyeCoo mühendislik firması ve PE Uluslararası Sürdürülebilirlik Uzmanları'nın 2012 yılında yayınlamış olduğu "Life Cycle Assessment of Supercritical Fluid dyeing vs. Jet dyeing" raporundan alınan veriler ile aynı varsayılmıştır (Jewell, 2012). Bu sebeple yapılan bu çalışmada süperkritik boyamanın sıcaklığı 120°C, 250 bar basınç ve 90 dakika olduğu varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 3.4. Süperkritik boyama proses akışı

Klasik Boyama

İpliği herhangi bir işlem görmemiş ham polyester kumaşlara üzerlerindeki kirlerin, yağların, uzaklaştırılması amacıyla ön işlem yapılmaktadır. Bu işlem özellikle koyu tonlara boyanacak kumaşlar için önemli bir prosestir. Açık tonlara boyanacak, beyaz olarak satışa sunulacak veya baskı altı olarak kullanılacak kumaşlarda ön işlem prosesi biraz daha ağırlaştırılmaktadır. Etki derecesi yükseltilmiş ön işlem prosesinde, ağartma işlemi olarak tanımlamak mümkündür. Kumaştan bu yabancı maddelerin uzaklaştırılması ile kumaşın su, kimyasal ve boyarmadde alma yeteneği daha da artacağı için, ön işlem prosesinden sonra boyama adımında daha iyi neticeler elde edilmektedir. Ayrıca ön işlem ile; poliester içeren kumaşlarda poliesterin üzerindeki iplik üretim aşamalarından gelen eğirme yağları da uzaklaştırılmış olmaktadır.

Firmadan alınan bilgiler doğrultusunda koyu renk boyama süreleri aşağıdaki işlem akışlarına göre doldur-boşalt zamanları hariç tutularak 128,5 dk yaklaşık olarak 2,14 saat sürmektedir. Doldur-boşalt zamanları da dahil edildiğinde bu süre 4-4,5 saatlere kadar çıkmaktadır.

Firmadan alınan verilere göre klasik boyama işlemi aşağıdaki proses işlem akışına göre gerçekleşmektedir.

Koyu Renk Boyamak için;

1. Ön işlemi yapılır. (Her iki boyamada da ön işlem olduğu için sistem sınırlarına dahil edilmemiştir.)
2. Banyoya sıcak su alınır.
3. Köpük kesici dozajlanır. (5 dk)
4. Sıcaklık 50 °C'de olduğu kontrol edilir.
5. Tampon asit dozajlanır. (5 dk)
6. Sıcaklık 50 °C'de olduğu kontrol edilir.
7. Egalizatör dozajlanır. (5 dk)
8. Sıcaklık 50 °C'de olduğu kontrol edilir. Tutma zamanı 5 dakikadır.
9. pH kontrol edilir. 4,5-5 olmalıdır.
10. Boyarmadde 50 °C'de dozajlanır. (10 dk) Tutma zamanı 10 dakikadır.
11. Sıcaklık 80 °C'ye yükseltilir. (3 °C/dk)
12. Sıcaklık 100 °C'ye yükseltilir. (1,5 °C/dk)
13. Sıcaklık 130 °C'ye yükseltilir. (1 °C/dk) Tutma zamanı 35 dakikadır.
14. Sıcaklık 70 °C'ye düşürülür. (1 °C/dk)
15. Renk kontrolü yapılır.
16. Renk onaylandığında banyo direkt boşaltılır.
17. Rezerv tankından banyoya 70 °C'de su alınarak durulama yapılır. (3 °C/dk) Tutma zamanı 20 dakikadır.
18. Banyo direkt boşaltılır.
19. Rezerv tankından yeniden banyoya su alınır. Sıcaklık 60 °C'de olduğu kontrol edilir.
20. Kostik dozajlanır. (5 dk)

21. Sıcaklık 80 °C'ye direkt yükseltilir.
22. Alkali redükten dozajlanır. (5 dk)
23. Sıcaklık 85 °C'ye yükseltilir. (3 °C/dk) Tutma zamanı 20 dakikadır.
24. Sıcaklık 70 °C'ye düşürülür. (3 °C/dk)
25. Banyo direkt boşaltılır.
26. 19. ve 25. Adımlar yeniden tekrarlanır. 2 kez indirgen yıkama yapılır.
27. Rezerv tankından banyoya su alınır.
28. Nötralizasyon asidi dozajlanır. (5 dk) Tutma zamanı 10 dakikadır.
29. Banyo direkt boşaltılır.
30. Kumaş jetten çıkarılır.

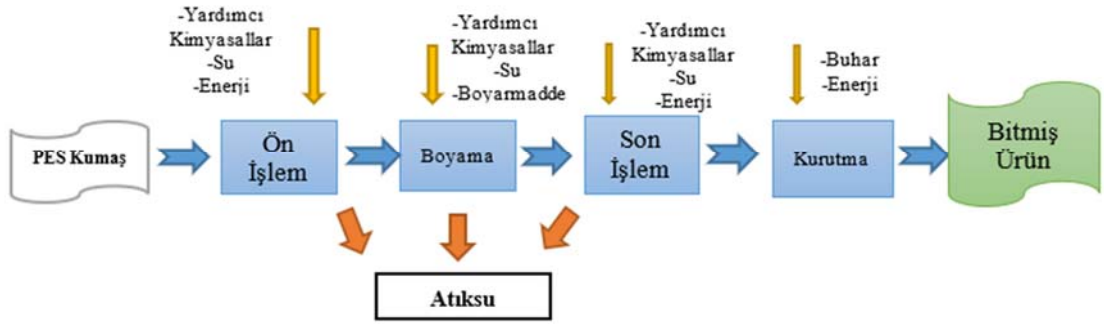
Açık renk boyamada boyama süresi doldur-boşalt süreleri hariç en az 70 dk sürmektedir. Doldur-boşalt zamanları da dahil edildiğinde bu süre 2,5-3 saatlere kadar çıkmaktadır.

Açık renk boyamak için;

1. Ön işlem yapılır.
2. Banyoya sıcak su alınır.
3. Köpük kesici dozajlanır. (5 dk)
4. Sıcaklık 50 °C'de olduğu kontrol edilir.
5. Tampon asit dozajlanır. (5 dk)
6. Sıcaklık 50 °C'de olduğu kontrol edilir.
7. Egalizatör dozajlanır. (5 dk)
8. Sıcaklık 50 °C'de olduğu kontrol edilir. Tutma zamanı 5 dakikadır.
9. pH kontrol edilir. 4,5-5 olmalıdır.
10. Boyarmadde 50 °C'de dozajlanır. (10 dk) Tutma zamanı 5 dakikadır.
11. Sıcaklık 80 °C'ye yükseltilir. (1 °C/dk)
12. Sıcaklık 100 °C'ye yükseltilir. (1,5 °C/dk)
13. Sıcaklık 130 °C'ye yükseltilir. (1 °C/dk) Tutma zamanı 35 dakikadır.
14. Sıcaklık 70 °C'ye düşürülür. (2 °C/dk)
15. Renk kontrolü yapılır.
16. Renk onaylandığında banyo direkt boşaltılır.
17. Banyo direkt boşaltılır.

18. Kumaş jetten çıkarılır.

Örnek bir boyama prosesi aşağıdaki şekil 3.5' te gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Klasik boyama proses akışı

3.4.2. Yaşam döngüsü analizi (LCA) yöntemi

Susuz ve klasik boyama proseslerinin karşılaştırmasında ISO 14044 standardı çerçevesinde LCA kullanılmıştır. LCA kapsamında aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

1. Hedef ve kapsam belirleme
2. Envanter analizi
3. Etki değerlendirmesi
4. Sonuçların yorumlanması

Hedef ve Kapsam Belirleme: Fonksiyonel birim olarak 100 kg kumaş belirlenmiştir. Ölçüm sınırları boyama makinasına giriş, yıkama ve kurutma olarak belirlenmiştir.

"Envanter toplama" aşamasında toplanan verilerin belirli bir kaliteye sahip olması, eksik parametre olmaması ve sapmalara izin verilmemesidir. Dolayısıyla bu aşamada prosesin girdi-çıktıları belirlenir, verilerin nasıl ölçüleceği ve hesaplanacağı tesis teknisyenleri ile birlikte karar verilmiştir.

Envanter analizi: Üretim sürecindeki girdi ve çıktıları takip ederek belirlenen hesaplama ve ölçüm yöntemine göre hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler SimaPro yazılımına girilmiştir. Veritabanı olarak EcoInvent 3 kullanılmaktadır. SimaPro sonuçları doğrultusunda Sankey Diyagramları Ek kısmında verilmektedir.

Etki değerlendirmesi: Etki değerlendirmesi, CML IA-Temel ve Kümülatif Enerji Talebi yöntemlerine göre SimaPro kullanılarak yapılmıştır.

CML IA mevcut durum yöntemine göre hesaplanan çevresel etkiler:

- Deniz ekotoksitesisi: Deniz ekosistemini etkileyen toksik maddeleri ifade eder. Birim: kg 1.4-DBeq
- Küresel ısınma (GWP100a): Atmosfere salınan sera gazlarını ifade eder. Birim: kg CO₂eq
- İnsan sağlığına etkisi: İnsan vücuduna yönelik sağlık risklerini ifade eder. Birim: kg 1.4-DBeq
- Akarsu Ekotoksitesisi: Tatlı su kaynaklarının kirlenmesini ifade eder. Havaya, suya ve toprağa atılmasının sonucudur. Birim: kg 1.4-DB eşd.
- Karasal ekolojik toksisite: Bu kategori, toksik maddelerin karasal ekosistemler üzerindeki etkisini ifade eder. Birim: kg 1.4-DBeq
- Asitleştirme: Asitlemenin toprak, yeraltı suyu, yüzey suyu, organizmalar ve kullandığımız malzemeler üzerinde çok çeşitli etkileri vardır. Birim: kg SO₂eq
- Ötrofikasyon: Hava, su ve toprakta aşırı besin maddelerinin oluşmasını ifade eder. Birim: kg PO₄eq
- Fotokimyasal oksidasyon: İnsan sağlığına, ekosistemlere ve mahsullere zararlı aktif maddelerin oluşumunu ifade eder. Birim: kg C₂H₄eq
- Doğal kaynakların tükenmesi: Bu etki türünde minerallerin ve fosil yakıtların çıkarılması ve sisteme dahil edilmesini ifade eder. Doğadaki bu kaynakların

görülme sıklığı ve yenilenme hızı, etkinin şiddetini belirlemektedir. Birim: kg Sbeq

- Ozon tabakası inceldikçe daha fazla UV-B ışını yeryüzüne ulaşır. Sonuç olarak insan ve hayvan sağlığı, karasal ve sucul ekosistemler ve biyokimyasal döngüler yok edilmektedir. Birim: kg CFC-11 eşd.

Tüketilen kümülatif enerji miktarını hesaplamak için Cumulative Energy Demand metodu kullanılmaktadır. Kümülatif enerji, bir ürün veya hizmetin enerji ayak izidir.

Çalışmada çevresel etki için SimaPro yazılımının kullanılmasına ek olarak; elektrik, su ve buhar tüketimi de hesaplanmış, iki prosesin tüketimleri karşılaştırılmıştır.

Sonuçların yorumlanması: Envanter analizi ve etki değerlendirmesinde, araştırma sonuçları için kilit noktalar belirlenmiş ve herhangi bir hata olmaması için kilit noktalar yeniden incelenmiştir. İlgili sonuç ve yorumlar Bölüm 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.4.3. Test yöntemleri

Boyama ve yıkama adımlarında oluşan atıksuların çevreye olan etkilerini hesaplamak için aşağıdaki atıksu parametreleri akredite kuruluş tarafından analiz edilmiştir:

- Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)
- Biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ)
- Askıdaki katı maddeler (AKM)
- pH
- Sıcaklık
- Toplam-Azot
- Renk
- Amonyum-N
- Toplam-Fosfor
- AOX
- Yağ ve gres
- Fenol

- Koliform
- Siyanür
- Sülfür
- Sülfid
- İletkenlik

4. BULGULAR

Çevresel etkiler ve kaynak tüketimlerinde verilen sonuçlar, ISO 14040 ve ISO 14044 standardına göre LCA çalışmasının “Hedef ve Kapsam Belirleme” aşamasında seçilen fonksiyonel birime göre (100 kg kumaş) hesaplanmıştır.

4.1. Yaşam Döngüsü Envanteri

4.1.1. Birim proses açıklamaları

Her bir boya senaryosu için toplu veri toplamak yerine, hammadde bilgileri, proses enerjisi ve emisyonlar birim prosese göre bölünür;

- Boyama,
- Yıkama / Durulama
- Kurutma

Birim süreç düzeyinde verilerin oluşturulması, LCA sonuçlarına daha fazla ayrıntı düzeyi sağlar ve gelecekte süreç iyileştirme projelerinin hedeflenmesine yardımcı olur.

4.2. Veri Toplama

Yapılan çalışmada kumaşı boyamak için firmadan aşağıdaki kategorilerde veri toplanmıştır.

- Yakıt ve enerji kullanımı,

- Boya ve yardımcı malzemelerin kullanımı,
- Hava, su ve toprak emisyonları.

Susuz boyama prosesleri için veriler, DyeCoo mühendislik firması ve PE Uluslararası Sürdürülebilirlik Uzmanları'nın 2012 yılında yayınlamış olduğu "Life Cycle Assessment of Supercritical Fluid dyeing vs. Jet dyeing" raporundan alınmıştır (Jewell, 2012).

4.3. Kaynak Tüketimleri

Susuz ve klasik boyamaya göre karşılaştırmalı kaynak tüketim tablosu Çizelge 4.1'deki gibidir.

Çizelge 4.1. Boyama yöntemlerine göre girdiler ve çıktılar (Fonksiyonel birim 100 kg poliester kumaş)

Proses Adımları	Birim	Klasik Boyama Açık Ton	Klasik Boyama Koyu Ton	Süperkritik Boyama Açık Ton	Süperkritik Boyama Koyu Ton
Boyama ve Yıkama					
Elektrik	kWh	19,248	48,120	111,480	139,259
Buhar	kWh	422,195	1054,637	183,518	229,629
Su	l	1653	4132	800	800
Boya	kg	0,004	1,303	2,000	2,180
CO₂	kg	0	0	31,660	31,660
Kurutma					
Elektrik	kWh	11,466	28,665	6,259	6,259
Doğalgaz	kWh	187,237	468,092	187,237	468,092
Buhar	kWh	0	0	64,814	64,814
Su	l	310	777	0	0

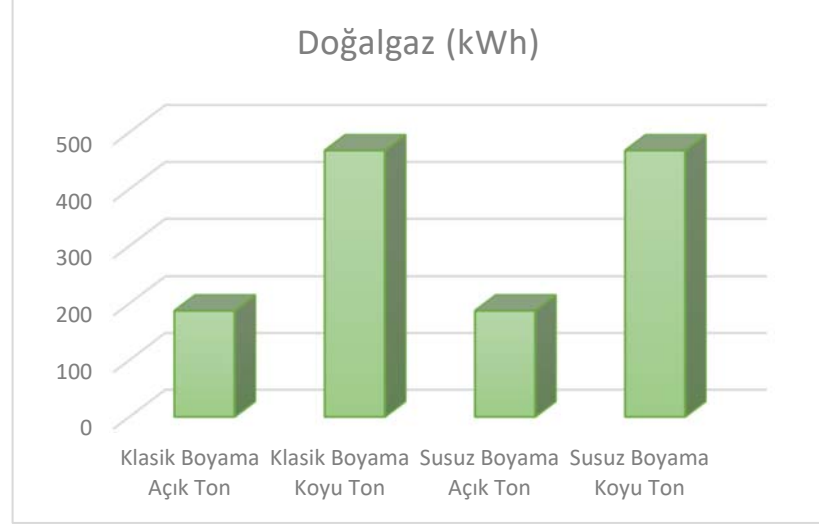
Çizelge 4.2. Boyama yöntemine göre toplam kaynak tüketimleri (Fonksiyonel birim 100 kg poliester kumaş)

Proses	Elektrik (kWh)	Toplam Su (l)	Buhar (kWh)	Doğalgaz (kWh)

Klasik Boyama Açık Ton	30,714	1963	422,195	187,237
Klasik Boyama Koyu Ton	76,785	4909	1054,637	468,092
Susuz Boyama Açık Ton	117,739	800	248,332	187,237
Susuz Boyama Koyu Ton	145,518	800	294,443	468,092

4.3.1. Doğalgaz

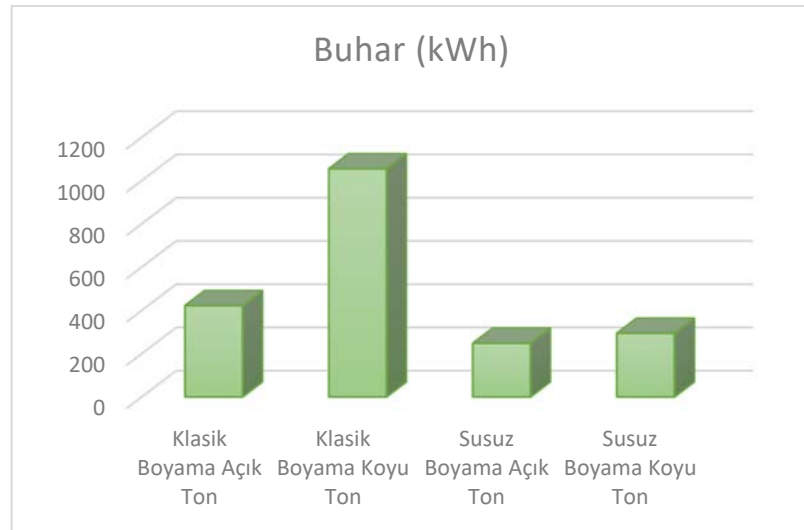
Firmada boyama sonrasında kurutma ve buhar eldesi amacıyla doğalgaz kullanılmaktadır. Susuz boyama işlemlerinde teorikte kurutma işlemi yapılmadığından doğalgaz kullanımının tamamı klasik boyama yönteminden gelmiştir fakat son yapılan çalışmalara göre süperkritik boyama sonrası ramöz mazkinasında kurutma işlemi de gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple doğalgaz verileri firma verileri ile aynı alınmıştır. Her iki boyama yönteminde de açık ve koyu tonlarda kurutma sırasında harcanan miktarlar aynıdır. Koyu ton boyamada yapılan kurutma işlemi sırasında harcanan doğalgaz miktarı, açık tonlarda yapılan kurutma işlemine göre 2,5 kat daha fazladır. Yöntem kısmında da belirtildiği gibi susuz boyama öncesi ön yıkama işlemi gerçekleştiği için boyama sonrası kurutma adımı eklenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda kurutma adımı gerçekleşmediği için doğalgaz kullanımı yoktur fakat işletme şartlarında yapılan susuz boyama sonrası kurutma adımı olduğu için bu çalışmada da varsayılmıştır. Bu varsayımlar doğrultusunda bile toplam harcamalara bakıldığında susuz boyamanın daha avantajlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre doğalgaz tüketimi

4.3.2. Buhar

Buhar tüketimi boyama ve sonrasında yapılan yıkama işleminde kullanılmaktadır. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi en fazla buhar tüketimi klasik boyamada koyu ton boyama işlemi sırasında harcanmaktadır. Bunun sebebi açık renk boyamada ekstra sıcak yıkama olmamasıdır. Susuz boyama buhar kullanımını açısından klasik boyamaya göre daha avantajlı olduğu görülmektedir.



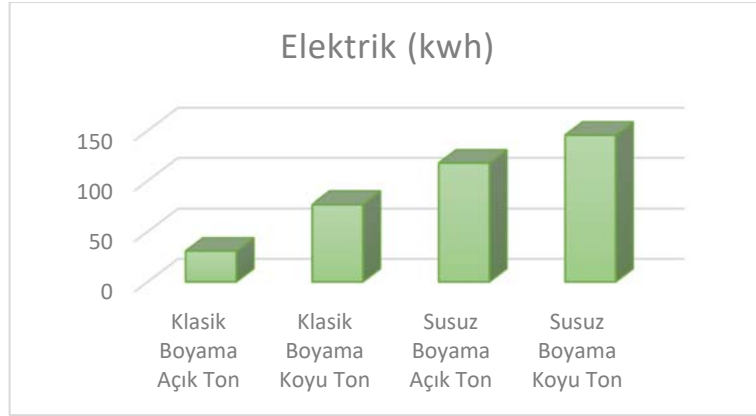
Şekil 4.2. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre buhar tüketimi

4.3.3. Elektrik

Çizelge 4.2’de susuz boyama ve klasik boyamada kullanılan elektrik tüketimleri gözlemlenmektedir. Firmadan alınan verilere göre klasik boyamada açık ton ve koyu ton renkler için farklı tüketim miktarları kullanılmaktadır.

Susuz boyama verileri, DyeCoo mühendislik firmasının PE Uluslararası Sürdürülebilirlik Uzmanları’nın 2012 yılında yayınlamış olduğu “Life Cycle Assessment of Supercritical Fluid dyeing vs. Jet dyeing” raporundan alınmıştır. Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi 100 kg kumaşı boyamak ve yıkamak için tüketilen enerji miktarı susuz boyamada daha fazladır. Bunun nedeni klasik boyama yönteminde boyama sürelerinin 4-5 saatlere kadar çıkıyor olmasıdır. Susuz boyama yönteminde ise boyama işlemi toplamda 1,5 saatte tamamlanmaktadır.

Alınan elektrik verileri kWh saat cinsinden hesaplanmıştır. Toplam boyama süreleri göz önüne alındığında süperkritik boyama daha avantajlı gözükmemektedir.

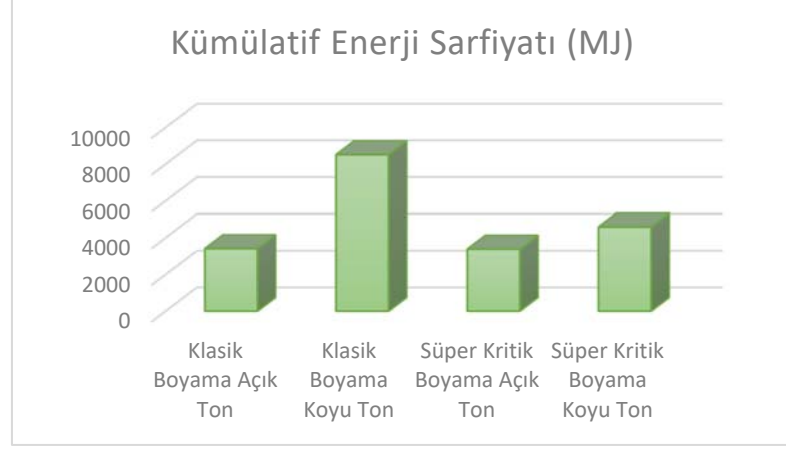


Şekil 4.3. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre enerji tüketimi

4.3.4. Kümülatif Enerji

Kümülatif enerji, bir ürünü üretmek için doğadan almamız gereken toplam enerjiyi ifade eder. Şekil 4.4’de görüleceği üzere, kümülatif enerji ihtiyaçlarının her iki üretim sürecinde de elektrik, buhar ve doğalgaz tüketimlerine paraleldir. Klasik boyama

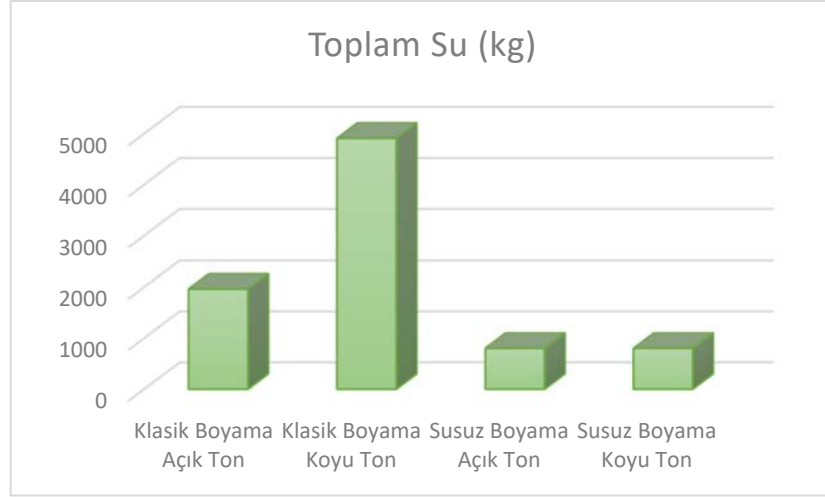
prosesinde koyu tonda boyamanın kümülatif enerjiyi arttırdığı görülmektedir. Bunun nedeni koyu tonlarda boyama işlemi için boyama sıcaklığının ve boyama süresinin açık tonlara göre daha fazla olmasıdır.



Şekil 4.4. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre kümülatif enerji tüketimi

4.3.5. Su

Süperkritik boyamanın en avantajlı yönü su kullanımının az miktarlarda gerçekleşmesidir. Su kullanımının büyük bir kısmı klasik boyamadan gelmektedir. Şekil 4.5' te görüldüğü gibi klasik boyama koyu ton su tüketimi, açık ton boyama ve susuz boyama yöntemine göre daha fazladır. Bunun nedeni açık ve koyu ton boyama adımlarında yıkama banyosu farkı olmasıdır. Açık ton boyamada boya verildikten sonra sıcaklık kontrolleri sonrasında renk kontrolü yapılır, renk onaylandıktan sonra banyo direkt boşaltılır ve kumaş jetten çıkartılır. Koyu ton boyama yaparken renk onaylandıktan sonra banyo boşaltılır ve yıkama adımları beş kere tekrarlanır. Süperkritik boyama esnasında su kullanımı, boyama öncesi kumaş üzerindeki yağı ve kiri arındırmak için yıkama esnasında tüketilmektedir.



Şekil 4.5. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre su tüketimi

4.4. Atıksu Analizleri

Atıksu yükünün geldiği proseslerde, akredite atıksu analizleri yapılarak çevresel yükü hesaplanmıştır. Boyama ve yıkama sonrası yapılan klasik boyama yapılan firmanın atıksu analiz raporu aşağıdaki Çizelge 4.3'te görüldüğü gibidir.

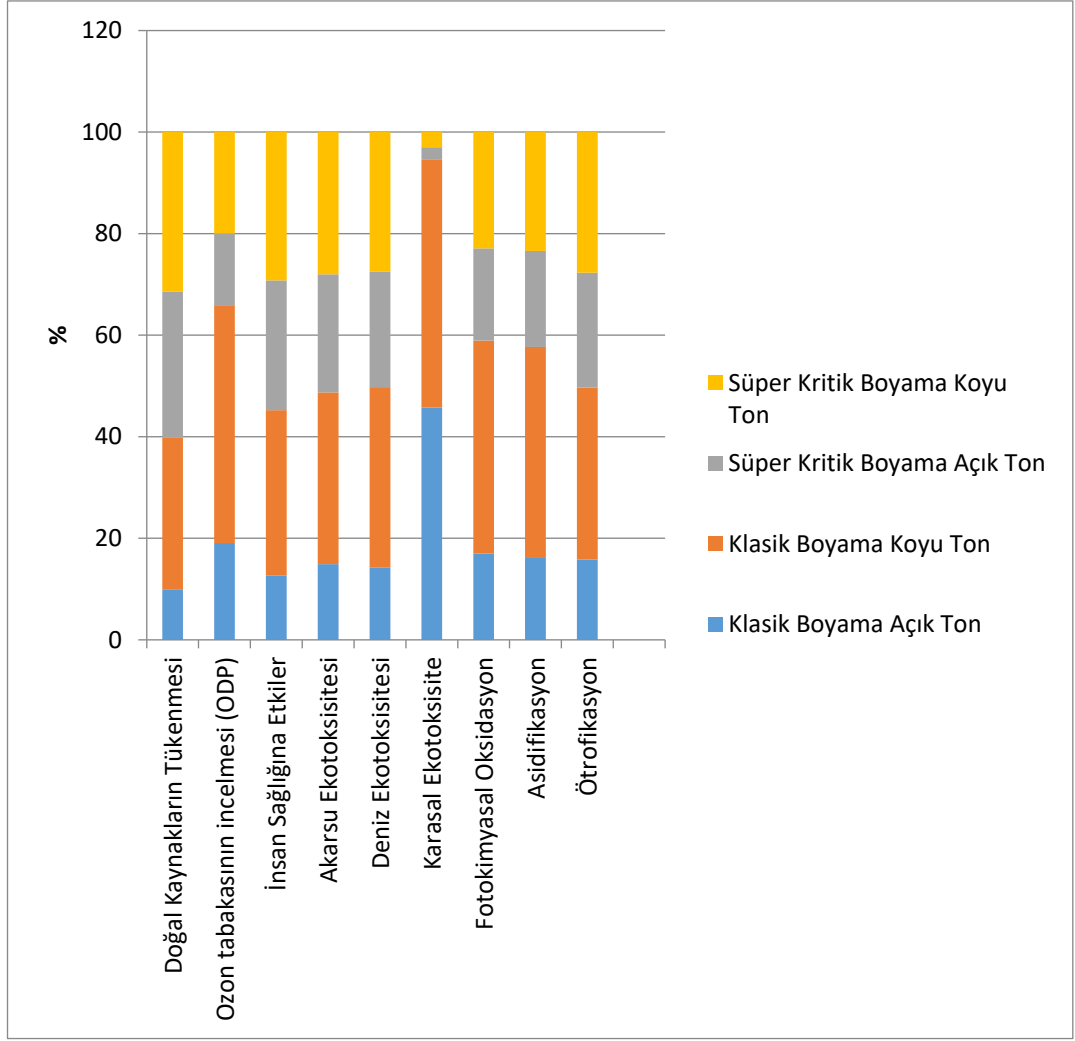
Çizelge 4.3. Atıksu analiz sonuçları (Firma verileri)

Parametreler	Test metodu	Raporlama Sınırı	Numune	Birim
Sıcaklık	EPA 170.1	N/A	45.4 (f)	°C
AKM	SM 2540 D	5 mg/L	55	mg/L
KOİ	SM 5220 D	16 mg/L	571	mg/L
Toplam Azot	ISO 5663	1 mg	261	mg/L
pH	EPA 150.1	N/A	9 (f)	
Renk [m-1]	ISO 7887-B	N/A	43.1; 39.5; 33.6	
BOİ/BOD₅	SM 5210 D	2 mg/L	200	mg/L
Amonyum-N	SM 4500 NH ₃ -N	0.2 mg/L	4	mg/L
Toplam-P	ISO 11885	0.04 mg/L	0.76	mg/L
AOX	ISO 9562	0.06 mg/L	ND	mg/L

Yağ ve gres	EPA 1664	0.5 mg/L	27	mg/L
Fenol	SM 5530 C&D	0.001 mg/L	0.027	mg/L
Koliform	ISO 9308-1	2 [CFU/100 ml]	10000	[CFU/100 ml]
Siyanür	SM 4500-CN-	0.02 mg/L	0.08	mg/L
Sülfür	SM 4500-S2-D	0.01 mg/L	0.28	mg/L
Sülfid	USEPA 377.1	0.2 mg/L	5.May	mg/L
İletkenlik (*)	EPA 120.1	N/A	1110 (f)	µS/cm

4.5. Çevresel Etkilerin Karşılaştırılması

Susuz ve klasik boyama teknolojilerinde hesaplanan çevresel etkiler Şekil 4.6 ve Çizelge 4.4'deki gibidir.



Şekil 4.6. Susuz ve klasik boyama yöntemine çevresel etkilerin karşılaştırılması

Çizelge 4.4. Susuz ve klasik boyama yöntemine çevresel etkilerin sayısal verileri

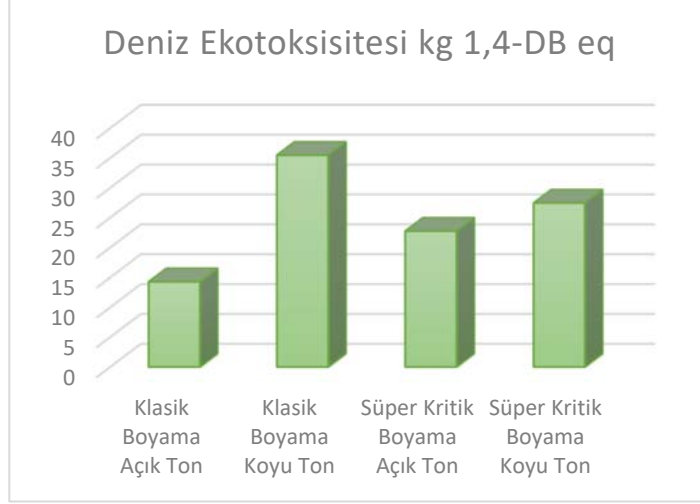
Etki Kategorisi	Birim	Klasik Boyama Açık Ton	Klasik Boyama Koyu Ton	Süper Kritik Boyama Açık Ton	Süper Kritik Boyama Koyu Ton

Doğal Kaynakların Tükenmesi	kg Sb eq	0,00018491	0,00055557	0,00053497	0,00058496
Küresel Isınma (GWP100a)	kg CO2 eq	234,31429	585,26453	236,66826	312,12846
Ozon tabakasının incelməsi (ODP)	kg CFC-11 eq	1,72E-05	4,23E-05	1,27E-05	1,81E-05
İnsan Sağlığına Etkiler	kg 1,4-DB eq	54,140394	139,80887	109,54598	125,31001
Akarsu Ekotoksitesitesi	kg 1,4-DB eq	47,794447	108,37328	74,605334	89,809936
Deniz Ekotoksitesitesi	kg 1,4-DB eq	143700,6	357214,99	229214,73	276474,49
Karasal Ekotoksitesite	kg 1,4-DB eq	3,6660661	3,9106629	0,19935048	0,23929941
Fotokimyasal Oksidasyon	kg C2H4 eq	0,039772666	0,098415035	0,042551048	0,05369331
Asidifikasyon	kg SO2 eq	0,76035738	1,9305491	0,88250131	1,0921215
Ötrofikasyon	kg PO4 eq	0,25050058	0,5357288	0,35871216	0,43843314

Susuz ve klasik boyama teknolojilerinde hesaplanan çevresel etkiler kapsamında kullanılan kimyasalların etkisi Sankey Diyagramı'nda gösterilerek Ek 5,6,7 ve Ek 8'de verilmektedir.

4.5.1. Deniz ekotoksitesitesi

Deniz ekotoksitesitesi etkisinde; elektrik tüketimi, doğalgaz kullanımı ve boyamada kullanılan kimyasallar etkilidir. Klasik boyamada renk oranı ile birlikte elektrik, doğalgaz ve buhar kullanımı arttığından deniz ekotoksitesitesi etkisi de artmaktadır (Şekil 4.7).



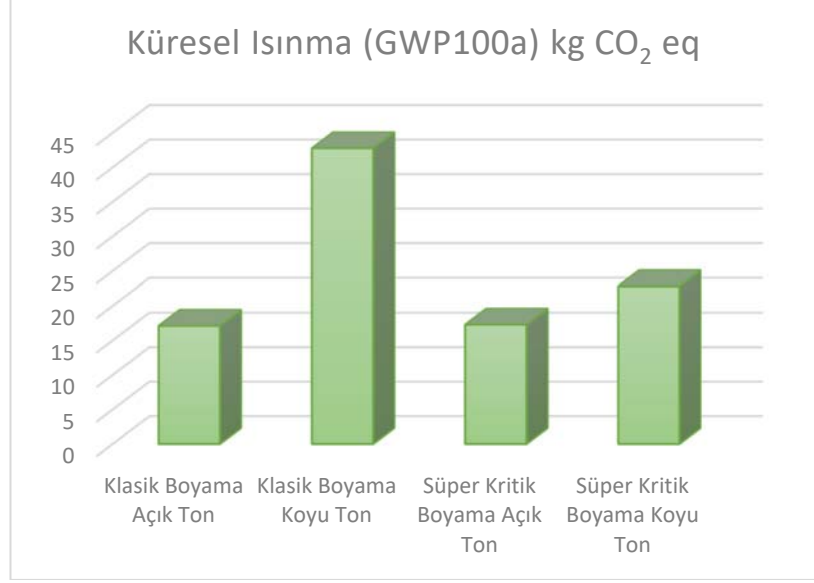
Şekil 4.7. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre deniz ekotoksitesitesi etkisi

4.5.2. Küresel ısınma (GWP100a)

Küresel ısınma potansiyeli, değişik sera gazlarının, karbondioksit referans değer (1) kabul edilerek 100 yıllık bir süre zarfındaki etkisini ifade etmektedir. Karbondioksit'in referans değer alınmasının temel sebebi binlerce yıl atmosferde kalabilmesinden kaynaklanmaktadır. Küresel ısınmanın klasik ve susuz boyama sonucunda etkilerini gösteren Sankey diyagramı sonuçları Ek 1,2,3 ve Ek 4'te gösterilmektedir.

Küresel ısınmanın etkileri temel olarak enerji kullanımıyla bağlantılıdır. Daha sonra yıkama işleminde kullanılan sabun ve doğalgaz tüketimi etkilidir. Klasik boyama yöntemine göre boyama, en büyük enerji talebine ve dolayısıyla birim proseslerin küresel ısınmasına sahiptir. Susuz boyama işleminin yıkama / durulama adımı, küresel ısınmayı doğrudan etkileyen bir CO₂ emisyonu içermektedir.

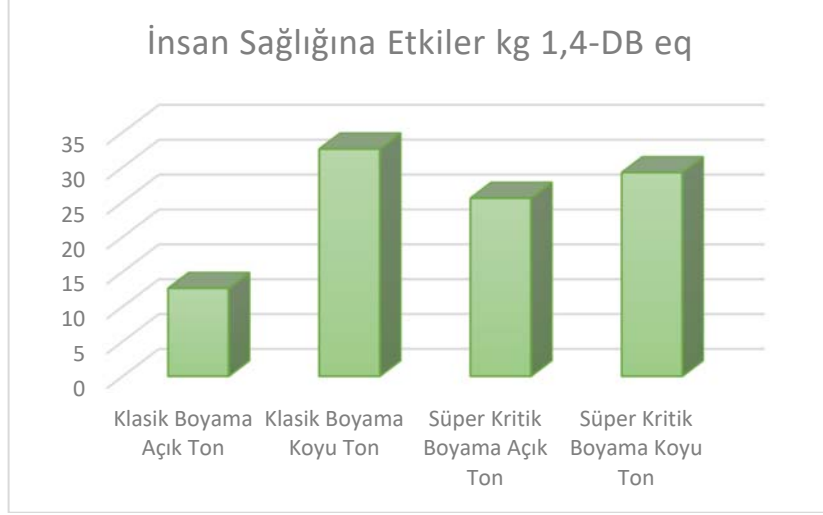
En büyük etki bu iki tüketimden kaynaklı olduğundan, proseslerin küresel ısınma etkisi enerji kullanımına paralel olarak artış göstermektedir. Aşağıdaki Şekil 4.8 iki teknoloji için küresel ısınma sürecinin küresel ısınmaya etkisini göstermektedir.



Şekil 4.8. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre küresel ısınma etkisi

4.5.3. İnsan sağlığına etkiler

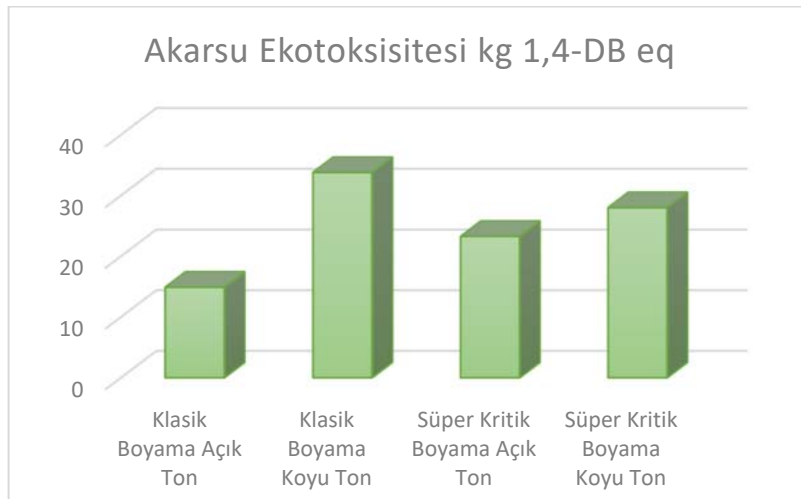
İnsan sağlığına etkisi, insan vücuduna yönelik sağlık risklerini ifade etmektedir. İnsan sağlığına en fazla etki elektrik tüketiminden, daha sonra doğalgaz tüketiminden ve boyama sırasında kullanılan boyarmadde ve kimyasallardan gelmektedir. Çevresel etki, proseslerde etkinin yoğun geldiği noktalardaki tüketim artışıyla paralel olarak artmaktadır. Klasik boyamada koyu renk boyama işlemindeki elektrik tüketimi arttığından artış göstermektedir (Şekil 4.9). Klasik boyama açık tonda, koyu tona göre kullanılan kimyasalların çoğu kullanılmadığı için bu çevresel etkinin şiddetinin klasik boyamada düşmesine neden olmuştur. Susuz boyamada kullanılan kimyasallar aynı olduğu için açık ton ve koyu ton boyamada en büyük etken kullanılan elektrik ve doğalgaz olmuştur.



Şekil 4.9. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre insan sağlığına etkiler

4.5.4. Akarsu ekotoksitesitesi

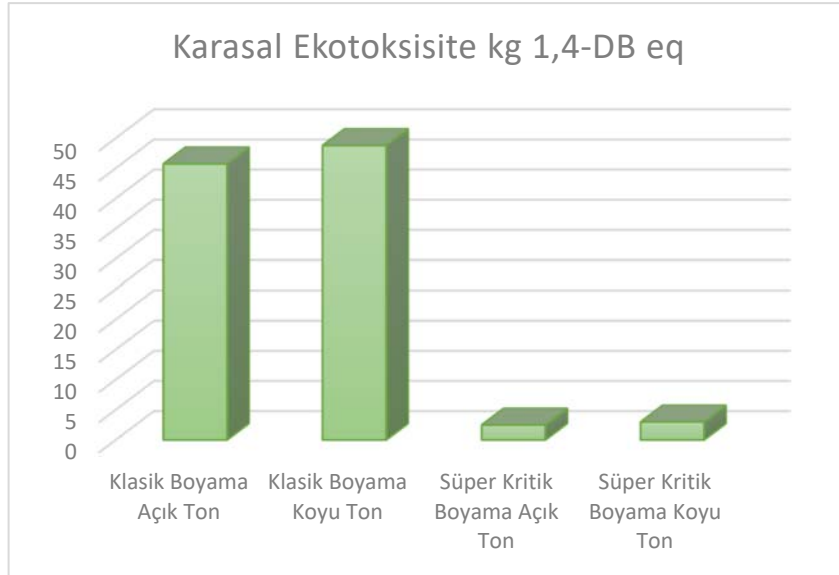
Akarsu ekotoksitesitesi etkisinde en yüksek çevresel etki; elektrik, klasik boyamada ve susuz boyamada kullanılan boyarmadde, kimyasal maddelerden ve yıkama işleminde kullanılan sabundan kaynaklanmaktadır. Susuz boyamada renk tonuna göre elektrik, kullanılan kimyasal ve yıkama işleminde herhangi bir değişiklik olmadığından Şekil 4.10'da çevresel etkisinde anlamlı bir değişim görülmemektedir. Ancak klasik boyamada renk tonu farklılığından akarsu ekotoksitesitesine neden olan sarfiyatların tüketimleri artmakta, renk tonuna göre çevresel etkiside artmaktadır.



Şekil 4.10. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre akarsu ekotoksitesitesi etkisi

4.5.5. Karasal ekotoksosite

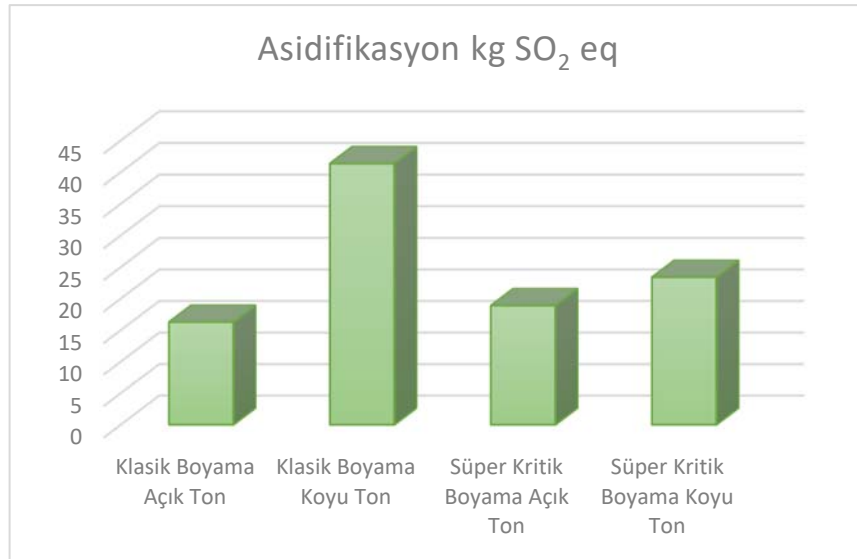
Karasal ekotoksosite etkisinin çok büyük bir kısmı boyama sonrası yıkama işleminde kullanılan sabundan kaynaklanmaktadır. Daha sonra kısmi olarak elektrik tüketimi etkilidir. Yıkama işlemi klasik ve susuz boyama için aynı şartlarda yapılmamaktadır. Susuz boyama prosesinde sadece boyama öncesi kumaş üzerindeki yağı ve kiri uzaklaştırmak için noniyonik deterjanla yıkama yapılmaktadır. Klasik boyamada ise boyama sonrası boya ve kimyasalları uzaklaştırmak için birkaç sefer yıkama işlemi tekrarlanmaktadır. Bu nedenle Şekil 4.11’te klasik boyamada yapılan fazla su tüketimi görülmektedir.



Şekil 4.11. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre karasal ekotoksitesite etkisi

4.5.6. Asidifikasyon

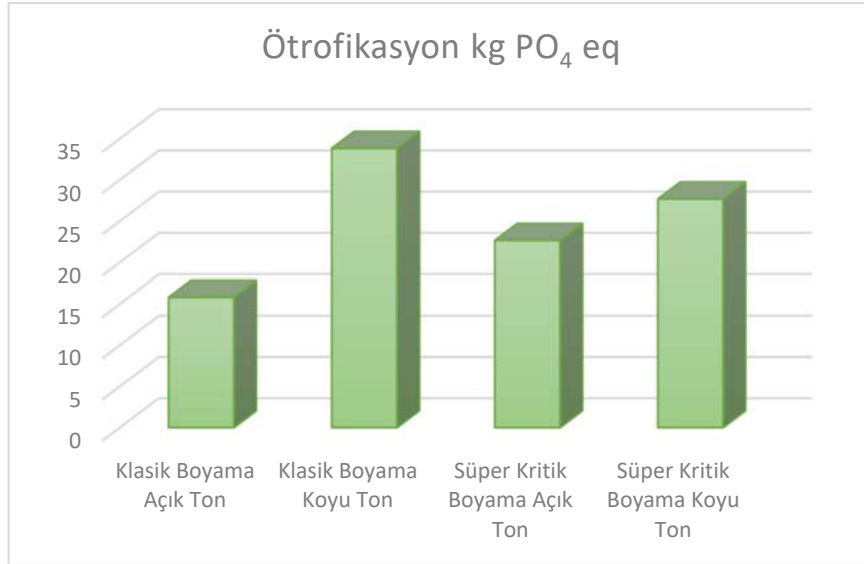
Asidifikasyon etkisi, klasik ve susuz boyamadaki boyarmadde ve kimyasal maddelerden kaynaklanmaktadır. Daha sonra elektrik ve doğalgaz etkili olmaktadır. Şekil 4.12’de görüldüğü gibi klasik boyamada kullanılan kimyasallar ve boyarmadde kullanımı ile birlikte asidifikasyon etkisi de artmaktadır. Susuz boyamada klasik boyamada kullanılan kadar kimyasal kullanılmadığından asidifikasyona etkisi elektrik ve doğalgazdan gelmektedir. Ancak klasik boyamada renk tonu arttıkça tüketimler arttığından asidifikasyon etkisi de artmaktadır.



Şekil 4.12. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre asidifikasyon etkisi

4.5.7. Ötrofikasyon

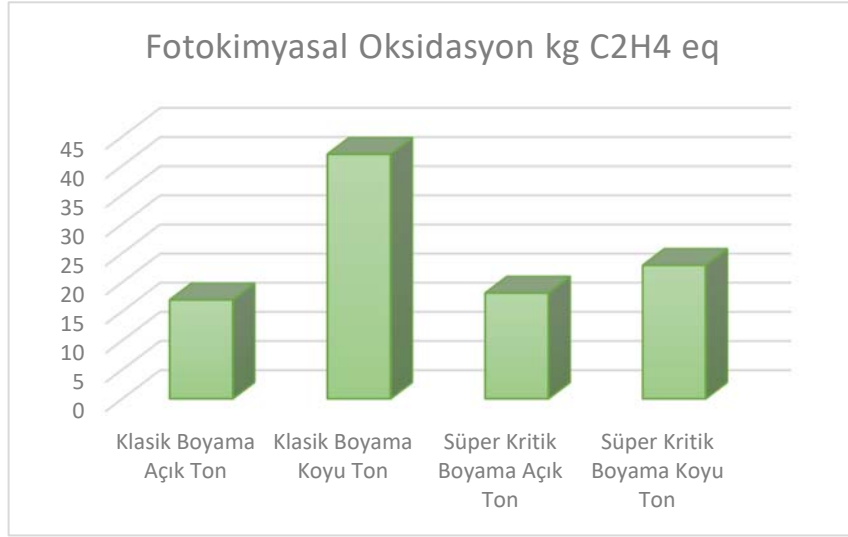
Ötrofikasyon etkisi yoğun olarak boyama sonunda yıkama işleminin atık suyundan kaynaklanmaktadır. Daha sonra elektrik kullanımı etkilidir. Üretim teknolojisi ve renk tonuna göre ötrofikasyon etkisi karşılaştırması Şekil 4.13'deki gibidir. Çevresel etkideki farklılığı elektrik tüketimi belirlemektedir. Klasik boyamada kullanılan elektrik, renk tonu ile birlikte artarak ötrofikasyon etkisini artırmaktadır. Susuz boyamada ise renk tonuna göre elektrik tüketiminde fazla bir değişim görülmediğinden, ötrofikasyon etkisinde de renk tonuna göre klasik boyamadaki değişim kadar bir değişim gözlemlenmemektedir.



Şekil 4.13. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre ötrofikasyon etkisi

4.5.8. Fotokimyasal oksidasyon

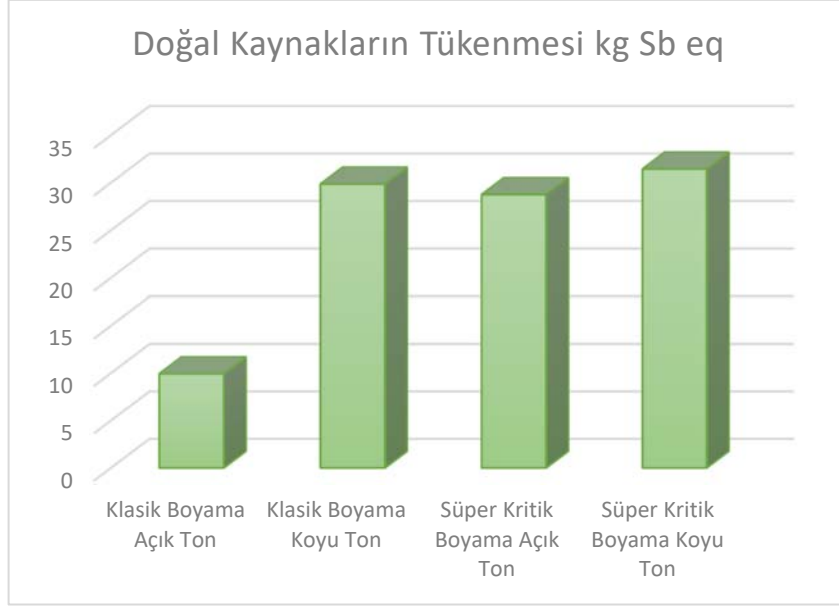
Fotokimyasal oksidasyon üzerine en yüksek etki, klasik boyamada kullanılan boyarmadde ve yardımcı kimyasal maddelerin kullanımından kaynaklanmaktadır. Daha sonra doğalgaz ve elektrik etkili olmuştur. Enerji kullanımı ve kimyasal arttıkça fotokimyasal oksidasyon etkisinde artış gözlemlenmektedir (Şekil 4.14). Susuz boyamada noniyonik deterjan-ıslatıcı olarak kullanıldığı için renk tonuna göre çok anlamlı bir değişim görülmemektedir. Ancak klasik boyamada renk tonu ile birlikte kimyasal kullanımı arttığından fotokimyasal oksidasyon etkisi artmaktadır.



Şekil 4.14. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre fotokimyasal oksidasyon etkisi

4.5.9. Doğal kaynakların tükenmesi

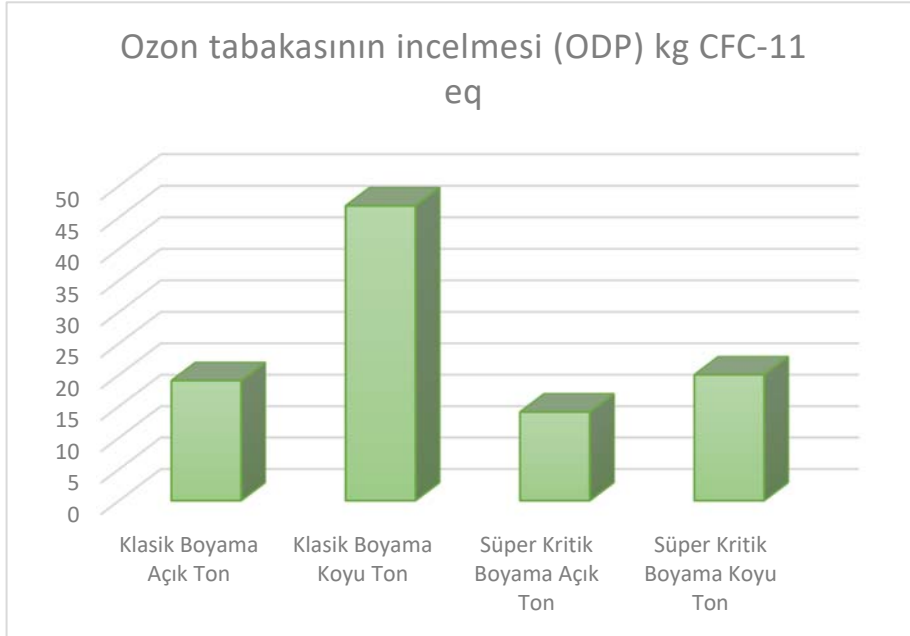
Doğal kaynakların tükenmesi etkisi, hammadde ve enerji tüketimlerinden kaynaklanmaktadır. En yüksek etki klasik boyamada kullanılan kimyasallardan kaynaklanmaktadır. Proseslerin doğal kaynakların tükenmesi etki kategorisinde karşılaştırması Şekil 4.15'teki gibidir.



Şekil 4.15. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre doğal kaynakların tükenmesi etkisi

4.5.10. Ozon tabakasının incelmesi

Ozon tabakasının incelmesi üzerinde en fazla etki, kullanılan kostik, elektrik ve doğalgaz kullanımından gelmektedir. Bu parametrelerin tüketimindeki artışa paralel olarak ozon tabakasının incelmesi etkisi artmaktadır. Boyama teknolojisi ve renk tonuna göre karşılaştırma grafiği Şekil 4.16'daki gibidir. Şekil 4.16 incelendiğinde, susuz boyama renk tonu değişikliğinden çok büyük bir farklılığın olmadığı görülmektedir. Klasik boyamada ise renk tonu değişikçe kimyasal ve enerji kullanımı arttığından, ozon tabakasına etki artmaktadır.



Şekil 4.16. Susuz ve klasik boyama yöntemine göre ozon tabakasının incelmesi etkisi

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Süperkritik CO₂ ortamında tekstilde boyama çalışmaları ile ilgili olarak birçok hammadde üzerine denemeler yapılmıştır. Bu denemeler doğal liflerde pamuk, ipek, yün gibi liflerdir. Sentetik liflerde ise poliester, naylon, polipropilen, aramid, akrilik, polilaktikasit gibi liflerdir.

Süperkritik boyamada poliester dışında maalesef ticarileşen lif grubu olmamıştır. Doğal lifler boyanırken bu boyarmaddeleri süperkritik ortamda life aktarabileceğimiz gruplar bulunmamaktadır. Bunun nedenine bakılacak olursa, karbondioksitin pamuğu şişirememesi ve boyama sırasında doğal nemi çıkarmasından dolayı pamuğun esnekliğinin kaybedilerek renk, haslık ve mukavemet ile ilgili olumsuz sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Polilaktikasit ile ilgili yapılan boyama çalışmalarında düşük sıcaklıkta bile daha koyu renkler elde edildiği fakat kumaşta tuşe sorunu yaşandığı görülmüştür.

Diğer yandan poliester, naylon, ipek, yün gibi lifler ve bunların karışımları laboratuvar ortamında etkili bir şekilde boyandığı bilinmektedir. Pamuk/poliester karışımlarına bakılacak olursa yaş haslıkları, renk haslıkları ve sürtünme haslıklarının yüksek çıktığı çalışmalar sonucu ortaya konulmuştur. Polipropilen ile yapılan boyama çalışması sonucunda renk haslıklarının çok düşük olduğu görülmüştür.

Yapılan boyama çalışmaları sonucunda en iyi sonuç veren lifin poliester olduğu ve bu konuda laboratuvar çalışmalarından çıkarak ticarileşme aşamasına geçen tek lif olduğu kanıtlanmıştır. Dolayısıyla özellikle sentetik lifler içerisinde dünyada en çok tüketilen lif poliester olduğu için bu konuda çok çalışma yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında poliester lifleri ile yapılan boyama çalışmaları sonuçlarında susuz ortamda boyama, klasik ortamda boyamaya göre daha çevreci sonuçlar verdiği gibi kumaşın kullanımı ile ilgili haslık ve renk değerlerinde optimum seviyelerde seyretmektedir.

Çalışmada tekstil boyamacılığında en yaygın olarak kullanılan klasik boyama ile günümüzde literatürde kullanımı hızla yaygınlaşan susuz boyama teknolojisinin enerji, kimyasal ve su gibi hammadde tüketimleri ile çevresel etkileri LCA metodolojisi ile karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırma sadece teknolojiye göre değil, aynı zamanda her bir teknolojinin kendi içerisinde renk tonuna göre de gerçekleştirilmiştir. Renk tonu karşılaştırmaları için her bir yöntemde açık renk ve koyu renk olmak üzere aynı kumaşın iki varyantı kullanılmıştır.

Her iki teknoloji kendi içlerinde renk tonuna göre karşılaştırıldığında, susuz boyamada renk tonuna göre tüketimlerde ve çevresel etkilerde anlamlı bir değişim olmadığı görülmektedir. Klasik boyamada ise renk tonuna göre tüketimlerin ve çevresel etkilerin arttığı görülmüştür.

Klasik Boyama teknolojileriyle karşılaştırıldığında, susuz boyama teknolojilerinin etki potansiyelleri oldukça düşüktür. Azalan kümülatif enerji tüketimi ve su kullanımının olmaması bu iyileştirmelerin ana itici güçleridir.

Klasik boyama teknolojileri için ana katkılar, boyama için gereken büyük hacimlerde suyu ısıtmak için kullanılan enerjiden gelmektedir. Her iki proseste elektrik ve doğalgaz tüketimi çoğu etki kategorisi için olumsuz etkiye neden olmaktadır. Susuz boyama, ısıtma için buhardan ziyade elektriğe ihtiyaç duyduğundan elektrik susuz boyama için önemli bir katkıdır.

LCA metodolojisi ile klasik ve susuz boyama teknolojilerinin karşılaştırılması sonucunda, iki teknoloji arasında enerji ve su tüketiminde belirgin farklar görülmüştür. Susuz boyamanın elektrik tüketimi klasik boyamadan daha fazladır. Bunun nedeni süperkritik boyamada CO₂'nin gaz halden likit haline çevirilmesi ve sonrasında tekrar gaz haline dönerken süperkritik fazında boyamanın gerçekleştiği sırada enerji tüketimi fazlalaşmaktadır.

Susuz boyamada renk tonuna göre çok büyük bir fark görülmezken klasik boyamada renk tonu arttıkça enerji tüketiminde artış gözlenmiştir. Kümülatif enerjiye bakıldığında

süperkritik boyamanın klasik boyamaya göre tüketim değerlerinin daha az olduğu görülmektedir. Doğalgaz tüketimi ise her iki proseste de koyu tonlarda açık tonlara göre daha fazla gerçekleşmektedir. Klasik boyama prosesinde su tüketiminin susuz boyamaya göre renk tonu koyulaştıkça daha fazla olduğu görülmüştür.

Klasik boyama prosesi bir boyama işlemini 2-5 saat aralığında tamamlarken, susuz boyama prosesi 1,5 saate boyama işlemini tamamlamaktadır. Susuz boyama işleminde boyama sonrasında kumaşın kuru çıkması prosesin avantajlarından biridir.

Klasik boyama prosesinde boyama sonrası yıkama işlemi gerçekleştiğinden dolayı su tüketimini arttırmakta; diğer yandan da kurutma için gereğinden fazla sıcak hava kullanılmakta ve artan doğalgaz sarfiyatı ile birlikte toplam enerji tüketimi artmaktadır. Ülkemizde elektriğin önemli oranda linyit gibi çevreye etkisi yüksek enerji kaynaklarından elde edilmesi dolaylı olarak üretilen ürünlerin de çevresel etkisinin daha yüksek olmasına neden olmaktadır.

LCA sonuçlarına göre doğal kaynakların tükenmesi ve insan sağlığına etkileri, çevresel etkilerinde her iki boyama prosesine göre karşılaştırıldığında açık ton boyamaların daha temiz olduğu görülmüştür. Fakat proses bazında inceleme yapıldığında süperkritik boyamanın daha avantajlı olduğu kümülatif sonuçlardan görülmektedir.

Küresel ısınma etkisi, ozon tabakasının incilmesi çevresel etkisi incelendiğinde susuz boyamanın klasik boyamaya göre daha çevreci olduğu görülmektedir.

Akarsu ekotoksitesitesi, deniz ekotoksitesitesi ve ötrofikasyon etkilerinde klasik boyama koyu tonun çevresel etkilerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Fotokimyasal oksidasyon ve asidifikasyon kategorilerinde renk tonu arttıkça klasik boyamanın çevresel etkisi, susuz boyama etkisine göre daha fazladır.

Karasal ekotoksitesite etkisinde ise klasik boyama prosesinin susuz boyama prosesine göre çok büyük bir fark görülmektedir.

Ayrıca sadece lif bazında ya da su tüketimi bazında değil örneğin çoğu toksik etkinin elektrik kullanımından kaynaklı olduğu görülmektedir. Yani işin temeline bakıldığında

elektrik enerjisini yenilenebilir enerji kaynaklarından kullanmanın, boyama çalışmalarını daha verimli hale getirebileceği öngörülmektedir.

Susuz ve klasik boyama sonuçlarına bakıldığında koyu tonlarda ekstra su, enerji ve kimyasal kullanımının açık tonlara göre daha fazla olmasından dolayı kişilerin kendi sağlıkları ve çevrenin korunması için üreticilere, tüketicilere ve nihai kullanıcılara açık tonlarda boyanmış ürünlerin seçilmesi önerilmektedir.

Diğer yandan doğal liflerin ticarileşmesi açısından bazı önemli denemeler yapılması gerekmektedir. Örneğin pamuk kullanımı, dünya pazarının %35'ini kapsamaktadır. Üretim sırasında pamuğun ekilmesinden kumaş olana kadar geçen süre zarfında en çok enerji ve su tüketimine neden olan liflerden bir tanesidir. Bu nedenle boyamak için yöntem geliştirmek önemli olacaktır.

Son olarak kumaş özellikleri açısından bakılacak olursa, boyama ile ilgili susuz ve klasik boyama açısından avantajlı olmayan bir durum gözükmemektedir.

KAYNAKLAR

Abate, M. T., Zhou, Y., Guan, J., Chen, G., Ferri, A., & Nierstrasz, V. (2020). *Colouration and bio-activation of polyester fabric with curcumin in supercritical CO₂*:

part II–effect of dye concentration on the colour and functional properties. The Journal of Supercritical Fluids, 157, 104703.

Ahmed, N. S., & El-Shishtawy, R. M. (2010). *The use of new technologies in coloration of textile fibers.* Journal of Materials Science, 45(5), 1143-1153.

Aksu, C. (2011). *Sürdürülebilir Kalkınma ve Çevre.* Güney Ege Kalkınma Ajansı, 1-33.

Alper, F. (2015). *Sürdürülebilirlik Kavramı İçerisinde Su Ayak İzi: Tekstil Sektörü Örneği* (Doctoral dissertation, İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü).

An Introduction to Supercritical Fluids. (2001). Erişim adresi: <http://www.nottingham.ac.uk/supercritical/scintro.html>

Anonim (2021), Erişim adresi: <https://www.wear2wear.org/de/>

Aydın, S. (2016). *Pamuklu ev tekstil ürünlerinin üretim süreçleri ve nihai ürünlerin yaşam döngüsünün değerlendirilmesi* (Master's thesis, Niğde Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü).

Aydoğdu, G. (2012). *Boyar madde içeren tekstil atıksularında renk gideriminin entegre arıtım yaklaşımıyla incelenmesi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Bach, E., Cleve, E., & Schollmeyer, E. (2002). *Past, present and future of supercritical fluid dyeing technology—an overview.* Review of Progress in Coloration and Related Topics, 32(1), 88-102.

Bach, E., Knittel, D., & Schollmeyer, E. (2006). *Dyeing poly (lactic acid) fibres in supercritical carbon dioxide.* Coloration technology, 122(5), 252-258.

Balci, O. (2011). *NEW APPROACHES FOR REDUCTIVE WASHING OF POLYESTER KNITTED FABRICS.* Textile and Apparel, 21(1), 42-49.

Balpetek, F. G., Alay, E., & Özdoğan, E. (2012). *Sürdürülebilir Kalkınma İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve Tekstil Sanayi.* Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(2), 37-49.

Banchero, M., Ferri, A., & Manna, L. (2009). *The phase partition of disperse dyes in the dyeing of polyethylene terephthalate with a supercritical CO₂/methanol mixture.* The Journal of Supercritical Fluids, 48(1), 72-78.

Banchero, M. (2013). *Supercritical fluid dyeing of synthetic and natural textiles—a review.* Coloration Technology, 129(1), 2-17.

Bashimov, G. (2017). *Türk tekstil ve hazır giyim sektörünün uluslararası rekabet gücü: ASEAN-5 ülkeleri ile karşılaştırmalı analiz*. Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 4(2), 1-15.

Baydar, G., Ciliz, N., & Mammadov, A. (2015). *Life cycle assessment of cotton textile products in Turkey*. Resources, Conservation and Recycling, 104, 213-223.

Bishop, P. L. (2000). *Environmental engineering education in North America*. Water Science and Technology, 41(2), 9-16.

Butekom. (2014). *Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi*. Erişim adresi: <http://www.butekom.org/Data/SayfaEk/4db1810c-1847-4b7d-af45-1cc747d7ec11.pdf>, Alındığı Tarih: Aralık 2020

Burdett, B. C., & King, A. J. (1999). *The dyehouse into the 21st century*. Review of Progress in Coloration and Related Topics, 29(1), 29-36.

Braun, G., Som, C., Schmutz, M., & Hischer, R. (2021). *Environmental Consequences of Closing the Textile Loop—Life Cycle Assessment of a Circular Polyester Jacket*. Applied Sciences, 11(7), 2964.

Cebeci, D. T. (2013). *Ekolojik tekstillerin moda tasarımı üzerine etkileri* (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).

Cid, M. F. (2005). Cotton dyeing in supercritical carbon dioxide.

Chen, F., Ji, X., Chu, J., Xu, P., & Wang, L. (2021). A review: life cycle assessment of cotton textiles. *INDUSTRIA TEXTILA Учредителу: Research Development National Institute for Textile and Leather*, 72(1), 19-29.

Curran, M. A., (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. EPA, Ohio, USA, 88pp

Çamur, C. (2010). *Isı yalıtım malzemelerinin yaşam döngüsü değerlendirme yöntemiyle çevresel etkilerinin değerlendirilmesi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Çolak, N., & Tülek, Y. (2003). *Süperkritik akışkan ekstraksiyonu*. Gıda, 28(3).

De Giorgi, M. R., Cadoni, E., Maricca, D., & Piras, A. (2000). *Dyeing polyester fibres with disperse dyes in supercritical CO₂*. Dyes and Pigments, 45(1), 75-79.

Demirer, G. (2011a). *Yaşam Döngüsü Analizi: Pratik Yaşam Döngüsü Analizi Klavuzu AB Sürecinde İşletmeler ve Kamu için Yaşam Döngüsü Analizi Yöntem ve Örnekleri*. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.

Demirer N. G. (2011b). *Çevre Alanında Kapasite Geliştirme Projesi Entegre Ürün Politikaları ve Sürdürülebilir Kaynak Yönetimi*. Bölgesel Çevre Merkezi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, REC Türkiye REW İstanbul. Erişim adresi: <https://docplayer.biz.tr/1951790-Yasam-dongusu-analizi-lca-ve-uygulama-ornekleri.html>

Devrent, N., ÖZCAN, A. S., & DURUR, G. (2006). *Süperkritik karbon dioksitte boyama*. 2006 (Cilt: 13), 62.

Ecolabelindex. (2020). Erişim adresi: www.ecolabelindex.com/ecolabel/blue-angel

Esteve-Turrillas, F. A., & de La Guardia, M. (2017). *Environmental impact of Recover cotton in textile industry*. Resources, conservation and recycling, 116, 107-115.

Esi, B. (2017). *Türk tekstil endüstrisi ve gelişimi*. Journal of Awareness (JoA), 2(Special), 643-663.

Güler, G., (2004). *Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve Çevre Mühendisliği Açısından Uygulama Alanları*, (Yayınlanmamış Lisans Tezi), Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.

Güney, İ. (2019). *Bursa kumaş üretiminin günümüzde tekstil sektörü içindeki yeri* (Master's thesis, Işık Üniversitesi).

Guzel, B., & Akgerman, A. (2000). *Mordant dyeing of wool by supercritical processing*. The Journal of Supercritical Fluids, 18(3), 247-252.

Gönel, F. D. (2002). *Globalleşen dünyada (nasıl bir) sürdürülebilir kalkınma*. Birikim Dergisi, 158, 72-80.

Harris, J. M. (2000). *Basic principles of sustainable development*. Dimensions of Sustainable Development, 21-41.

Hendrix, W. A. (2001). *Progress in supercritical CO₂ Dyeing*. Journal of Industrial Textiles, 31(1), 43-56.

Hou, A., Chen, B., Dai, J., & Zhang, K. (2010). *Using supercritical carbon dioxide as solvent to replace water in polyethylene terephthalate (PET) fabric dyeing procedures*. Journal of Cleaner Production, 18(10-11), 1009-1014.

ISO 14040 Çevre Yönetimi. (2016). *LCA Serisi*, Erişim adresi: <http://www.tse.gov.tr>

James, K. L. (2003). *Environmental life cycle costs in the Australian food packaging supply chain* (Doctoral dissertation, Victoria University of Technology).

Jewell, J. (2012). *Life Cycle Assessment of Supercritical Fluid dyeing vs. Jet dyeing*. PE International Experts In Sustainability.

Jun, J. H., Sawada, K., Takagi, T., Kim, G. B., Park, C. H., & Ueda, M. (2005). *Effects of pressure and temperature on dyeing acrylic fibres with basic dyes in supercritical carbon dioxide*. *Coloration technology*, 121(1), 25-28.

Kaplan, İ. (2011). *Karbon Yönetim Sistemi ve ISO 14064*. İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi, 23-24.

Kaya, K., & Güzel, B. (2011). *Doğal ve Sentetik Elyafların Süperkritik Karbondioksit Ortamında Boyanması*. Adana, Cilt:26-2

Kaya K., (2011). *Doğal ve Sentetik Elyafların Süperkritik Karbondioksit Ortamında Boyanması*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana

Kayaer, M., Çiftçi, S. (2018). *Su Sorunu ve Türkiye'nin Tatlısu Potansiyeli Çerçevesinde Türkiye'nin Sınırşan Sularının Stratejik, Etik ve Hukuki Boyutlarının Değerlendirilmesi*. *Pesa Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(3), 386-404.

Kocaer O.F., Alkan U., (2002). *Boyar Madde İçeren Tekstil Atıksularının Arıtım Alternatifleri*. Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa, Cilt 7, Sayı 1.

Kurtoğlu N., Şenol D., (2004). *Tekstil ve Ekolojiye Genel Bakış, Karsinojen ve Allerjik Etki Yapabilen Tekstil Kimyasalları*, KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, 7(1) s26-27.

Leblebici K.L., (2008). *Yeşil Pazarlama ve Kayseri'deki İşletmeler Üzerine Bir Uygulama*. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi İşletme Anabilim Dalı, Kayseri.

Liao, S.K., Ho, Y.C., Chang, P.S. (2000a). *Dyeing of nylon 66 with a disperse-reactive dye using supercritical carbon dioxide as the transport medium*. *Coloration Technology*, 116(12), 403-407.

Liao, S.K., Chang, P.S., Lin, Y.C. (2000b). *Analysis on the dyeing of polypropylene fibers in supercritical carbon dioxide*. *Journal of Polymer Research*, 7(3), 155-159.

Liao, S.K. (2005). *Dyeing nylon-6, 6 with some hydrophobic reactive dyes by supercritical processing*. *Journal of Polymer Research*, 11(4), 285-291.

Luiken A., Advies BV A., Saygın D., (2013). *Tekstil Ürünlerinin Çevresel Ayakizi, Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) ve EcoTool'un Sunumu*, Bursa, Türkiye.

Maeda, S., Kunitou, K., Hihara, T., Mishima, K. (2004). *One-bath dyeing of polyester/cotton blends with reactive disperse dyes in supercritical carbon dioxide*. *Textile Research Journal*, 74(11), 989-994.

- Militky, J. (2009). *The chemistry, manufacture and tensile behaviour of poliester fibers*. In *Handbook of tensile properties of textile and technical fibres*. Woodhead Publishing, (pp. 223-314).
- Miyazaki, K., Tabata, I., Hori, T. (2012). *Effects of molecular structure on dyeing performance and colour fastness of yellow dyestuffs applied to polypropylene fibres in supercritical carbon dioxide*. *Coloration Technology*, 128(1), 51-59.
- Moazzem, S., Daver, F., Crossin, E., Wang, L. (2018). *Assessing environmental impact of textile supply chain using life cycle assessment methodology*. *The Journal of the Textile Institute*, 109(12), 1574-1585.
- Montero, G. A., Smith, C. B., Hendrix, W. A., Butcher, D. L. (2000). *Supercritical fluid technology in textile processing: an overview*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 39(12), 4806-4812.
- Muthu, S. S., Gardetti, M. Á. (Eds.). (2020). *Sustainability in the Textile and Apparel Industries: Production Process Sustainability*. Springer Nature.
- Odabaşoğlu H.Y., Avinç O.O., Yavaş A., (2013). *Susuz Boyama*, *Tekstil ve Mühendis*, 20: 90, 63-79.
- Ogugbue, C.J., Sawidis, T. (2011). *Bioremediation and detoxification of synthetic wastewater containing triarylmethane dyes by Aeromonas hydrophila isolated from industrial effluent*. *Biotechnology research international*, 2011.
- Özcan, A.S., Özcan, A. (2005). *Adsorption behavior of a disperse dye on poliester in supercritical carbon dioxide*. *The Journal of Supercritical Fluids*, 35(2), 133-139.
- Özcan H., (2019). *Poliesterin Süperkritik Karbondioksit Ortamında Boyanmasında Proses Şartlarının Renge Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Yök Tez veri tabanından erişildi (596583).
- Özdemir S., Tekoğlu O., (2012). *Ekolojik Tekstil Ürünlerinde Kullanılan Hammaddeler*. 1. Uluslararası Moda ve Tekstil Tasarımı Sempozyumu, s 27.
- Piontek, F. M., Müller, M. (2018). *Literature reviews: Life cycle assessment in the context of product-service systems and the textile industry*. *Procedia CIRP*, 69, 758-763.
- Powar, A., Perwuelz, A., Behary, N., Hoang, L. V., Aussenac, T., Loghin, C., ... and Chen, G. (2021). *Environmental Profile Study of Ozone Decolorization of Reactive Dyed Cotton Textiles by Utilizing Life Cycle Assessment*. *Sustainability*, 13(3), 1225.
- Rott U., (2003). *Multiple Use of Water in Industry – The Textile Industry Case*, *J. Env. Sci. Health, part A – Tox. A38* (8), 1629.

Roos, S., Jönsson, C., Posner, S., Arvidsson, R., Svanström, M. (2019). *An inventory framework for inclusion of textile chemicals in life cycle assessment*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 24(5), 838-847.

Santos, W.L.F., Porto, M.F., Muniz, E.C., Povh, N.P., Rubira, A.F. (2001). *Incorporation of disperse dye in N, N-dimethylacrylamide modified poly (ethylene terephthalate) fibers with supercritical CO₂*. The Journal of Supercritical Fluids, 19(2), 177-185.

Santos, W.L., Moura, A.P., Povh, N.P., Muniz, E.C., & Rubira, A.F. (2005, November). *Anthraquinone and azo dyes in dyeing processes of PET films and PET knitted fabrics using supercritical CO₂ medium*. In Macromolecular Symposia (Vol.229, No.1, pp.150-159). Weinheim: WILEY-VCH Verlag.

Saus, W., Knittel, D., Schollmeyer, E. (1993). *Dyeing of textiles in supercritical carbon dioxide*. Textile Research Journal, 63(3), 135-142.

Serindağ, O. Halefoğlu Y.Z. (2000). *Tekstil Kimyası*. Ç.Ü Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Adana.

Seventekin, N. (2011). *Kimyasal Lipler*. E.Ü. Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma – Uygulama Merkezi Yayınları, Bornova/İzmir, 52.

Sunerli E., Aydın M.Ç., (2019). *Doğal boyamanın farklı tekstil lifleri ile oluşturulan yüzeylere etkisi*. The Journal of International Lingual Social and Educational Sciences, 5(1), 196-203.

Tabata, I., Lyu, J., Cho, S., Tominaga, T., Hori, T. (2001). *Relationship between the solubility of disperse dyes and the equilibrium dye adsorption in supercritical fluid dyeing*. Coloration technology, 117(6), 346-351.

Taşkın, E.G., Güney, S. (2014). *Tekstilde Çevre*, Butekom, Bursa

Toksöz M., (2018). *Tekstil Sektöründe Sürdürülebilirlik Kavramı ve Yaşam Döngüsü Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Yök Tez veri tabanından erişildi (528982).

Tong, Z., Kim, S.H. (Eds.). (2004). *Frontiers On Separation Science And Technology, Proceedings Of The 4th International Conference*. World Scientific.

Turkish Cultural Foundation (2021). Erişim adresi: <http://www.tcfdatu.org/tr/servisler/servisler/dogal-boyama-31.html>

Tušek, L., Golob, V., Knez, Ž. (2000). *The effect of pressure and temperature on supercritical CO₂ dyeing of PET-dyeing with mixtures of dyes*. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 47(4), 657-665.

Uludağ İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği Ar-Ge Şubesi. (2018). *Türkiye Tekstil Sektörü ve Bursa*.

Van Der Kraan, M., (2005). *Process and Equipment Development for Textile Dyeing in Supercritical Carbon Dioxide*.

Van der Kraan, M., Cid, M.F., Woerlee, G.F., Veugelers, W.J.T., Witkamp, G.J. (2007). *Dyeing of natural and synthetic textiles in supercritical carbon dioxide with disperse reactive dyes*. The Journal of Supercritical Fluids, 40(3), 470-476.

Yan, Y., Wang, C., Ding, D., Zhang, Y., Wu, G., Wang, L., ... and Zhao, C. (2016). *Industrial carbon footprint of several typical Chinese textile fabrics*. Acta Ecologica Sinica, 36(3), 119-125.

Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1996-2000). Web sitesinden erişilen adres : <http://cevrehendisligi.org/index.php/cevre-aktuel/cevre-hukuku/312--turkiye-ve-kyoto-protokolu>

Yiğit, İ., Eren, S. ve Eren, H., A. (2019). *Environmental Evaluation of Waterless Dyeing” 17th National 3rd International The Recent Progress Symposium On Textile Technology and Chemistry*, Bursa.

Yurdakul, A. Atav R. (2006). *Boya- Baskı Esasları*. E. Ü. Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma –Uygulama Merkezi Yayını, Bornova/İzmir, 65.

Zhang, Y., Kang, H., Hou, H., Shao, S., Sun, X., Qin, C., Zhang, S. (2018). *Improved design for textile production process based on life cycle assessment*. Clean Technologies and Environmental Policy, 20(6), 1355-1365.

Zheng, H., Xu, Y., Zhang, J., Xiong, X., Yan, J., Zheng, L. (2017). *An ecofriendly dyeing of wool with supercritical carbon dioxide fluid*. Journal of Cleaner Production, 143, 269-277.

Zollinger H., (1987). *Color Chemistry, Synthesis, Properties of Organic Dyes and Pigments, 2nded.*, VCH Publishers, New York, 92.

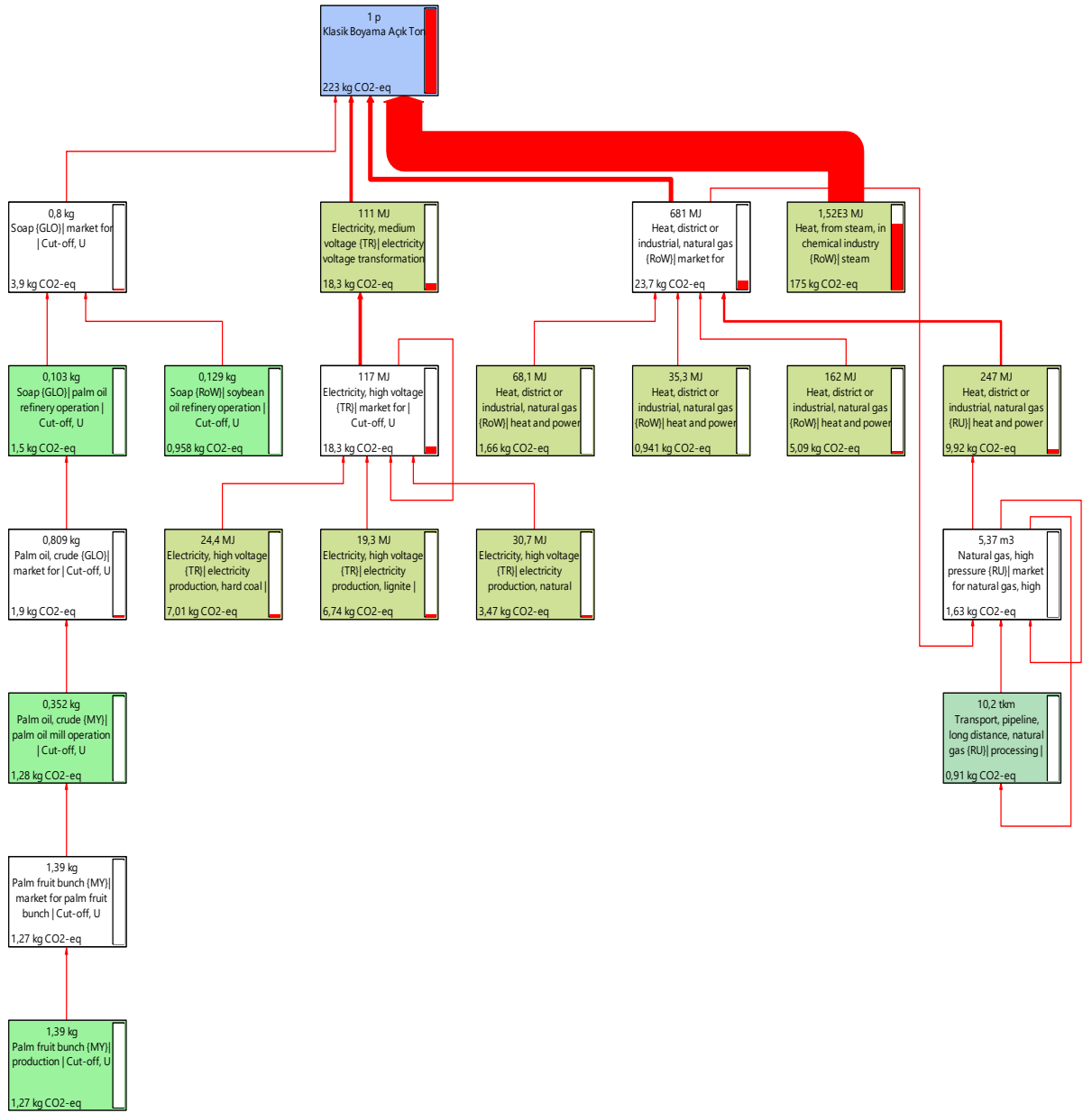
Wang, C.T., Lin, W.F. (2001). *Scouring and dyeing of poliester fibers in supercritical carbon dioxide*. Journal of Chemical Engineering of Japan, 34(2), 244-248.

Water and chemical free dyeing with CO₂. (2019). Erişim adresi: <https://www.wtin.com/article/2019/march/250319/water-and-chemical-free-dyeing-with-co2/?freeviewlinkid=99512>

Wen, H., Dai, J. J. (2007). *Dyeing of polylactide fibers in supercritical carbon dioxide*. Journal of Applied Polymer Science, 105(4), 1903-1907.

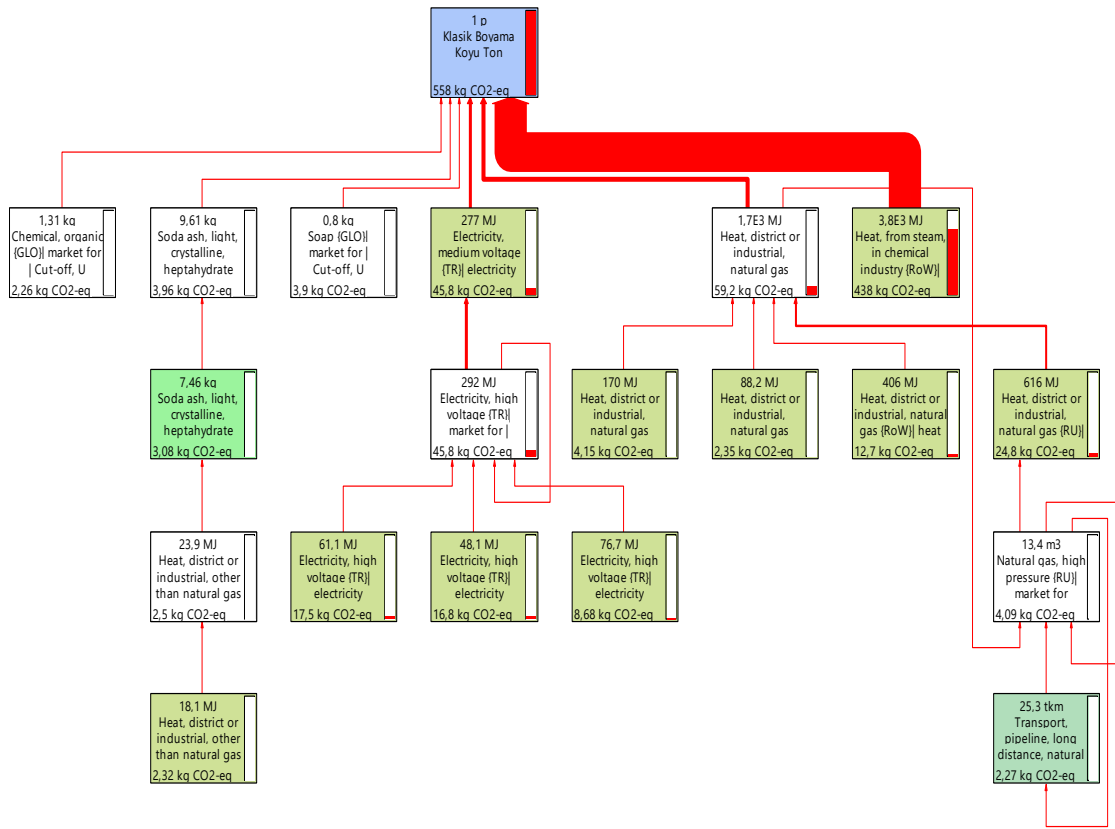
EKLER

EK 1 Klasik Boyama Açık Tonda Küresel Isınmanın Sankey Diyagramı



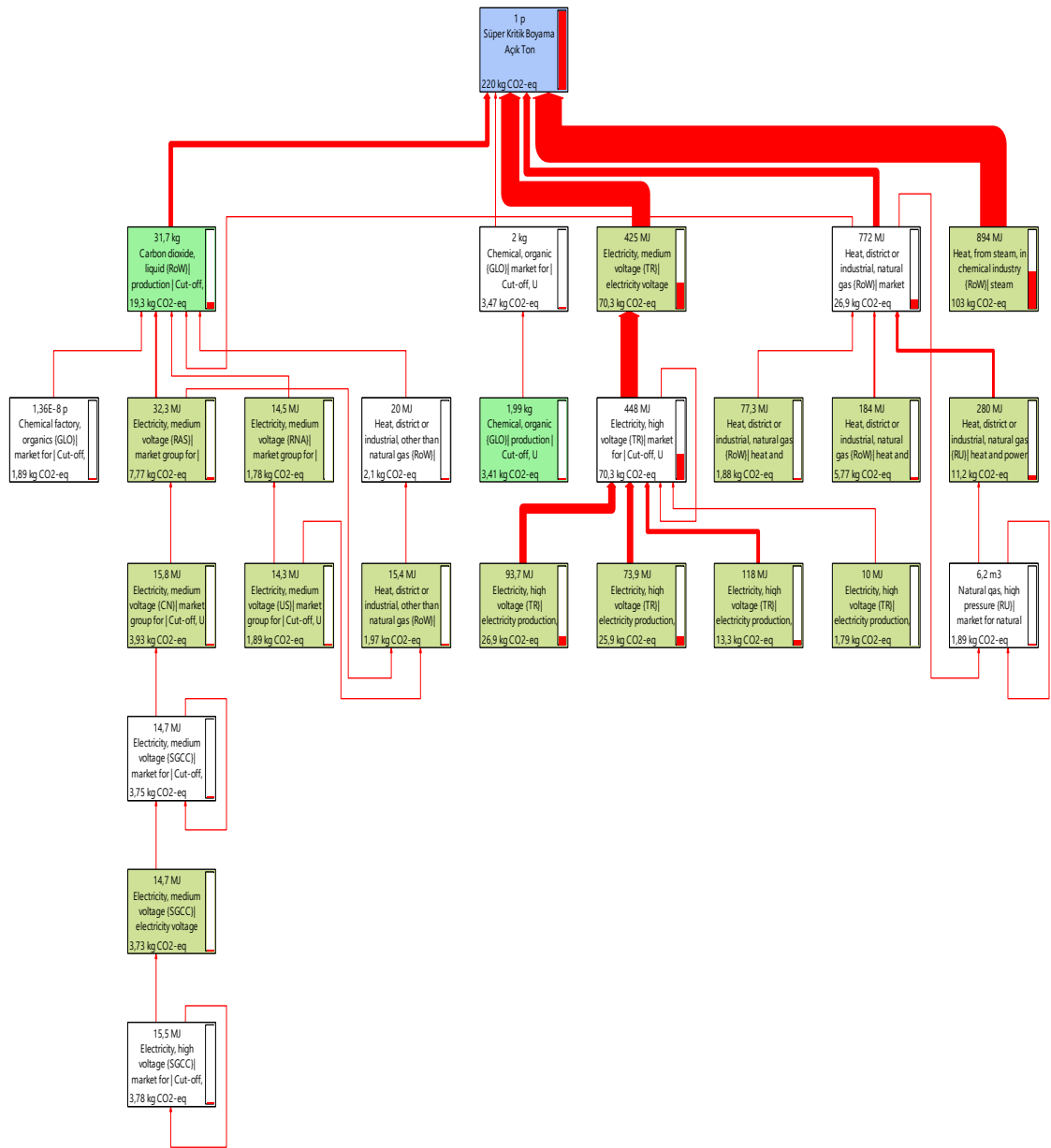
EK 2

Klasik Boyama Koyu Tonda Küresel Isınmanın Sankey Diyagramı



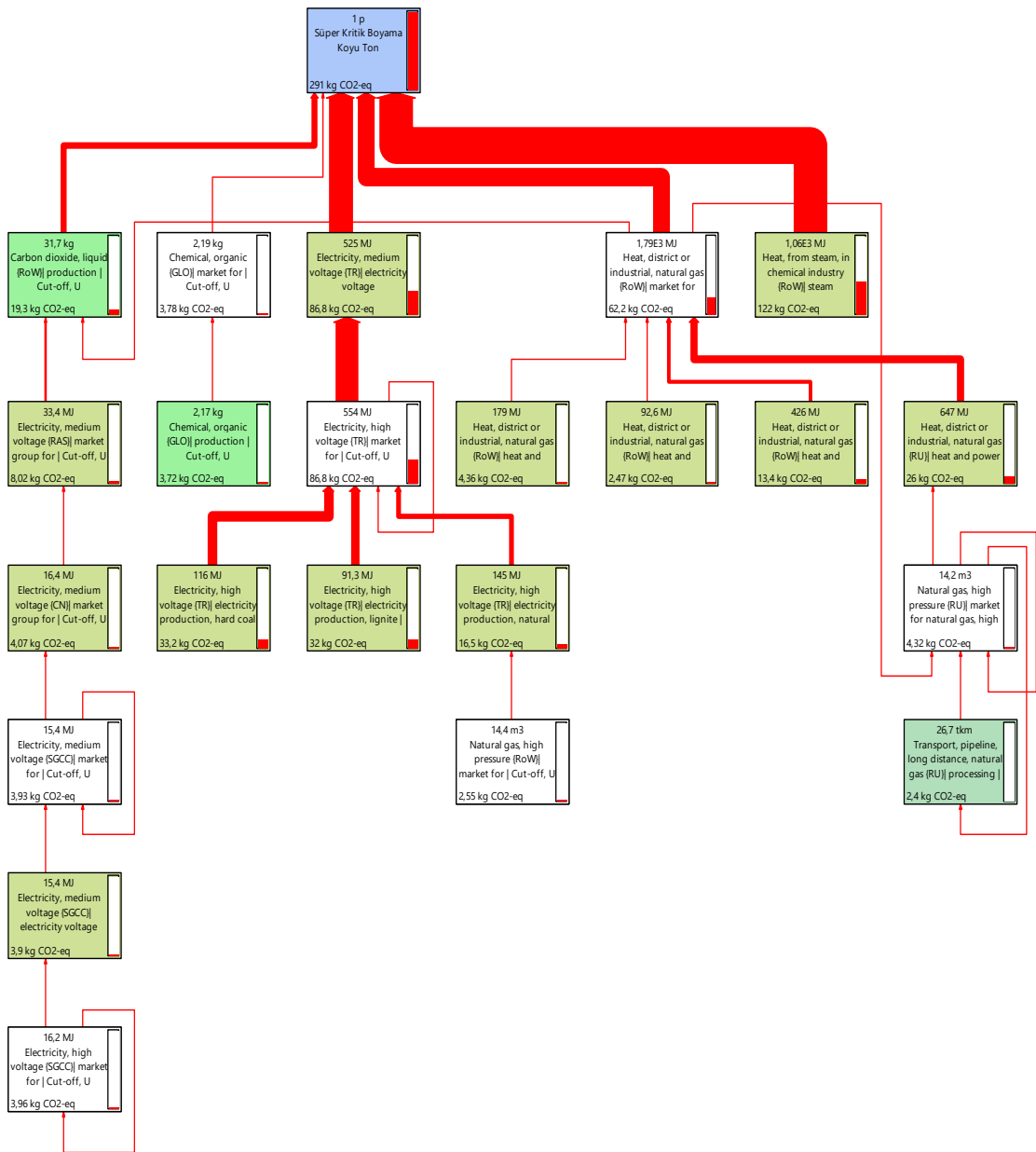
EK 3

Susuz Boyama Açık Tonda Küresel Isınmanın Sankey Diyagramı

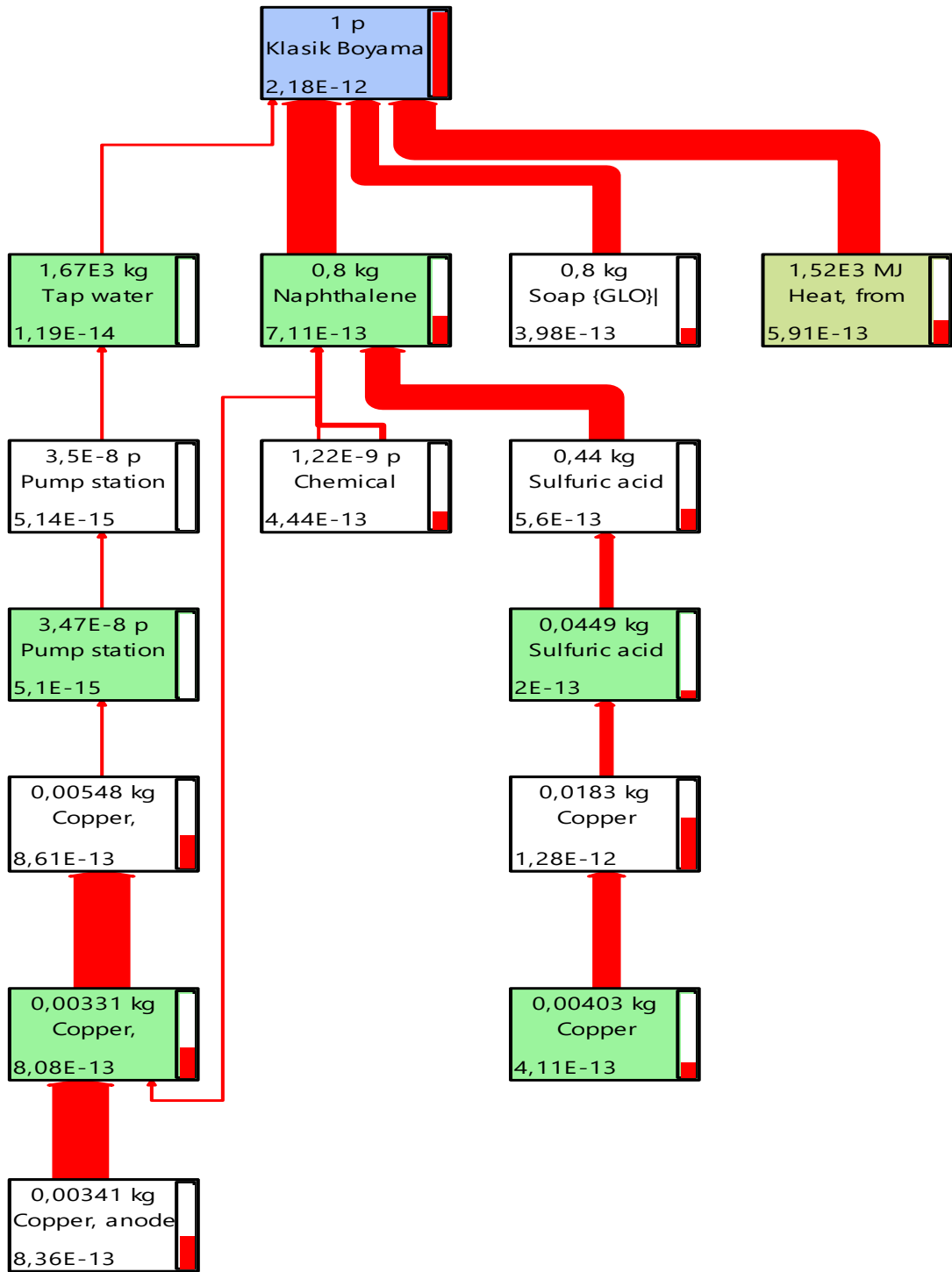


EK 4

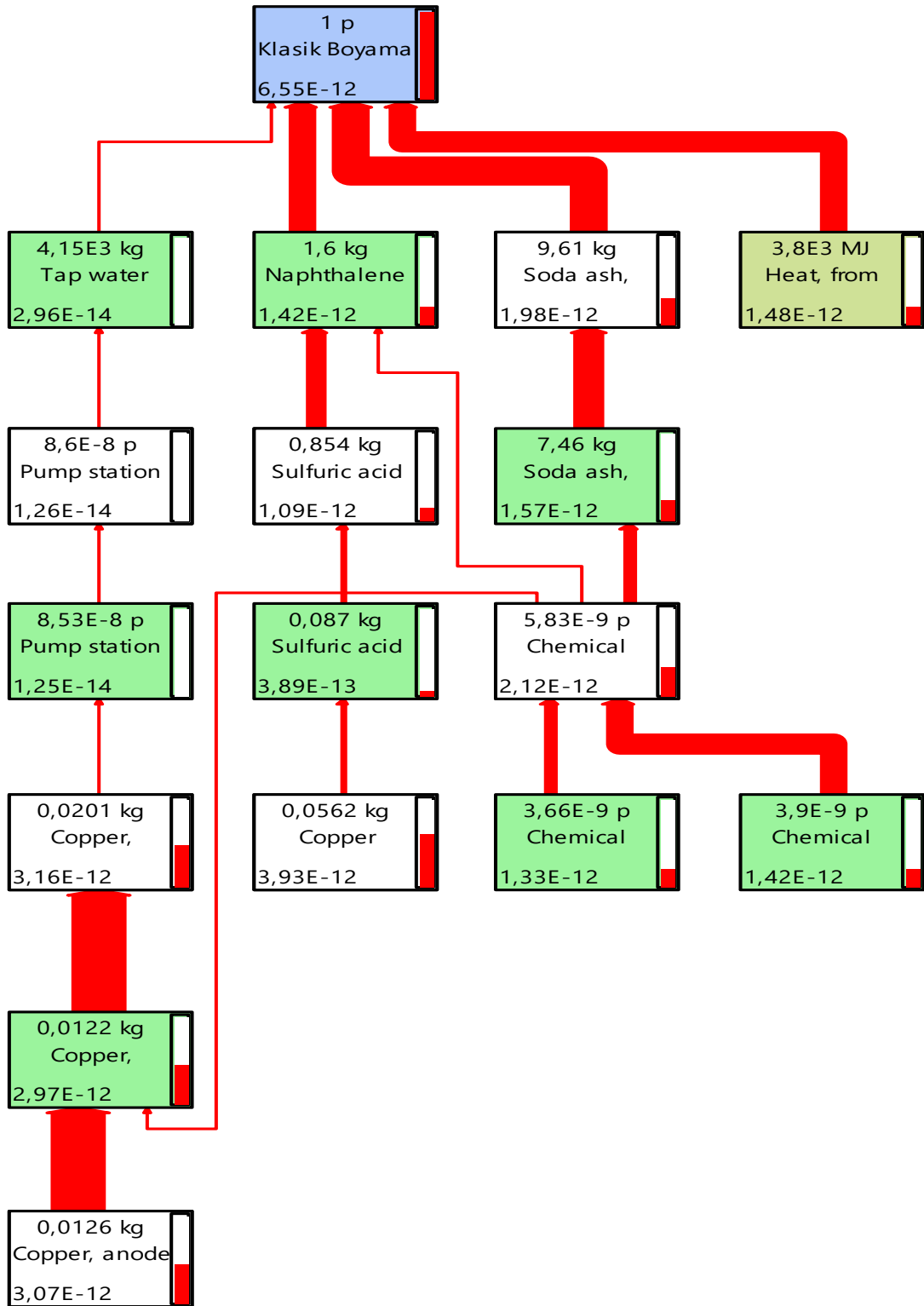
Susuz Boyama Koyu Tonda Küresel Isınmanın Sankey Diyagramı



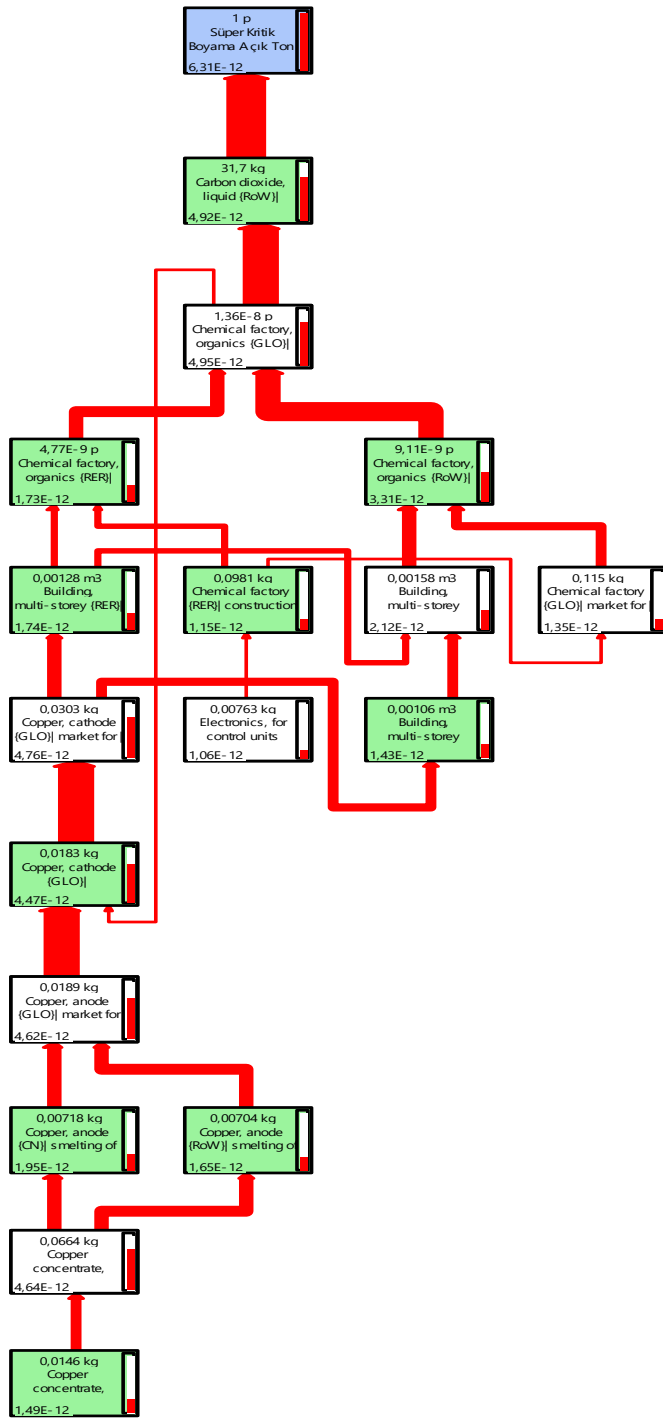
EK 5 Klasik Boyama Açık Tonda Kimyasal Maddelerin Sankey Diyagramı



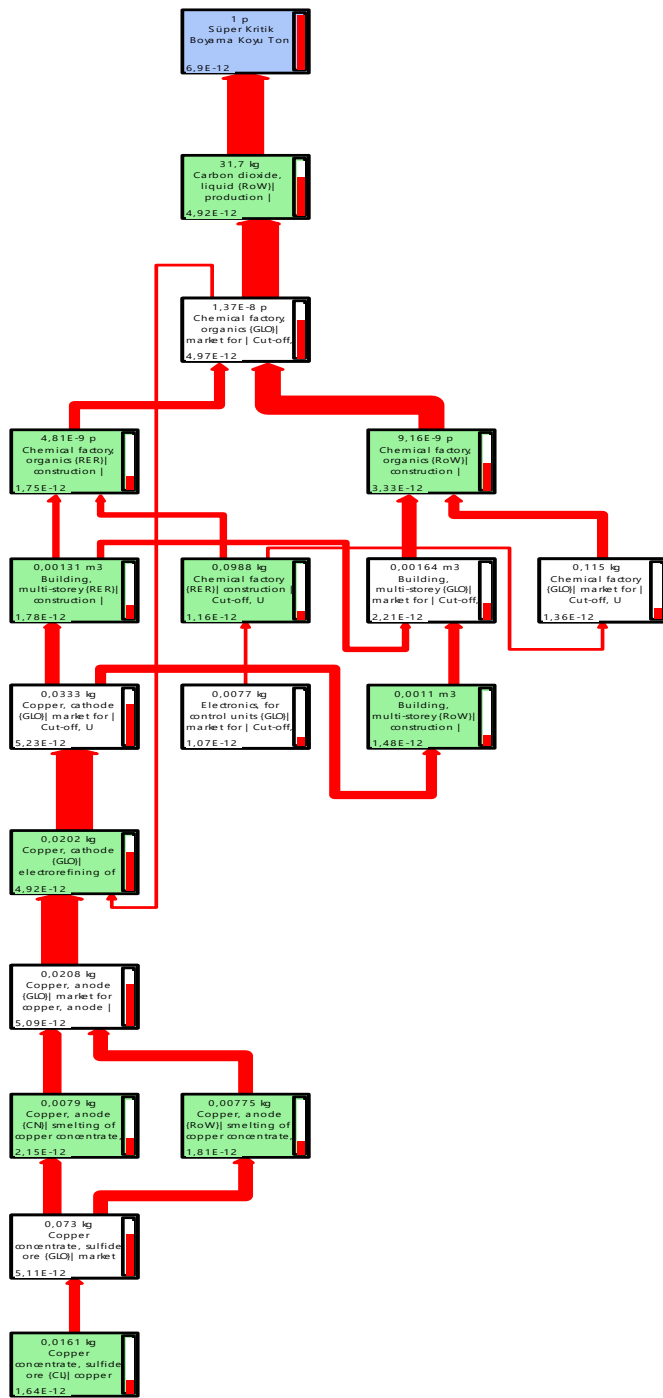
EK 6 Klasik Boyama Koyu Tonda Kimyasal Maddelerin Sankey Diyagramı



EK 7 Susuz Boyama Açık Tonda Kimyasal Maddelerin Sankey Diyagramı



EK 8 Susuz Boyama Koyu Tonda Kimyasal Maddelerin Sankey Diyagramı



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Neslihan KARADAĞ
Doğum Yeri ve Tarihi : Yıldırım/BURSA 04.11.1990
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Ali Osman Sözmez Teknik Lisesi
Lisans : Dokuz Eylül Üniversitesi Tekstil Mühendisliği
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Tekstil Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : BUTEKOM (2019-Halen Çalışmakta), Yeşim Tekstil (2017-2018), Sun Tekstil (2017), Ege İhracatçı Birlikleri-Teksmer Projesi (2016-2017)

İletişim (e-posta) : neslihansapmaz@hotmail.com

Yayımları :