





SÜPERKRİTİK VE KLASİK ORTAMDA POLİESTER BOYAMANIN YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

*Semiha EREN** 
*Neslihan KARADAĞ*** 
*İdil YİĞİT** 
*Hüseyin Aksel EREN** 

Alınma: 28.06.2022; düzeltme: 16.09.2022; kabul: 26.09.2022

Öz: Su hem yaşam için hem de sahip olduğu özellikleri nedeniyle de değerli bir kaynaktır. Bu nedenle, su kıtlığı ve artan çevre bilinci dünya çapında endişeye sebep olmaktadır. Tekstil sektörü genel olarak su tüketiminin yoğun olduğu proseslerden oluşmaktadır. Özellikle boyama işleminde çok fazla su kullanılmaktadır. Bu sebeple su kullanımının azalmasına yönelik boyama çalışmalarının her geçen gün önemini artacağı görülmektedir. Bu çalışmada, süperkritik karbondioksit (scCO₂) ortamda susuz ve klasik sulu ortamda bir adet % 100 poliester dokuma kumaş açık ve koyu tonda olmak üzere boyanmış, boyama proseslerinin aşamaları her iki ortam için de yaşam döngüsü analizi (LCA) yöntemi ile değerlendirilmiştir. Analiz için SimaPro 9.3 programı kullanılmış ve yapılan karşılaştırma kümülatif olarak süperkritik ortamda yapılan boyamada çevresel etkinin klasik sulu ortamda boyamayla karşılaştırıldığında göre daha az olduğu dolayısıyla daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Poliester, Klasik Boyama, Susuz (scCO₂) Boyama, Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)

Evaluation of Polyester Dyeing In Supercritical and Classical Environment With Life Cycle Analysis

Abstract: Water is a valuable resource both for life and because of its properties. Therefore, water scarcity and increasing environmental awareness cause worldwide concern. The textile industry generally consists of processes with intense water consumption. Especially in the dyeing process, a lot of water is used. For this reason, the importance of dyeing studies aimed at reducing water use that increases day by day. In this study, one %100 polyester woven fabrics were dyed in dark and light shade in supercritical carbon dioxide (scCO₂) media (waterless) and classic media (aqueous) and the dyeing process was evaluated by life cycle analysis (LCA) method in both media. SimaPro 9.3 program was used for the analysis and it was concluded that the environmental effect of dyeing cumulatively performed in the supercritical medium is less compared to dyeing in a classical aqueous medium, thus it is more advantageous.

Keywords: Polyester, Classical Dyeing, waterless (scCO₂) Dyeing, Life Cycle Analysis (LCA)

*Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü, 16059 Görükle Nilüfer, BURSA

**Butekom Bursa Teknoloji ve Koordinasyon Arge Merkezi Ltd.Şti.,16245 Osmangazi, Bursa

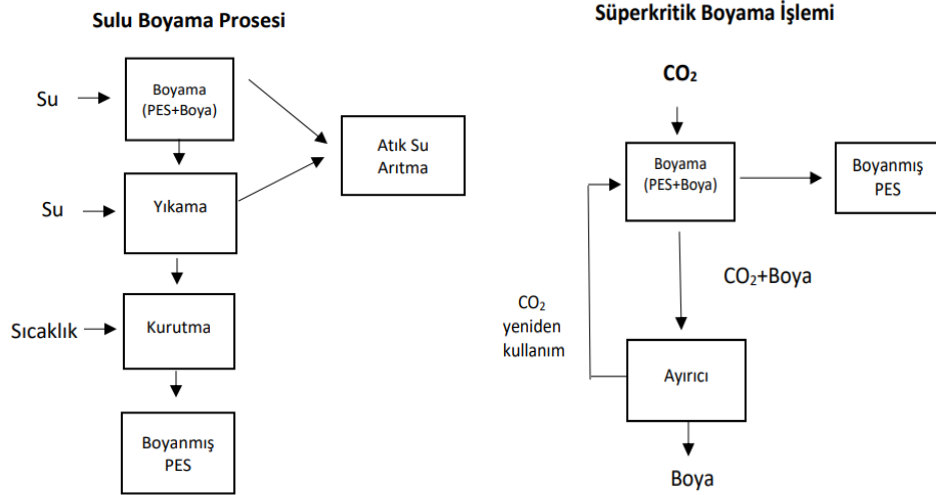
İletişim Yazarı: semihaeren@uludag.edu.tr

1. GİRİŞ

Birçok proses için tekstil sanayisi yüksek miktarda su ve kimyasal madde tüketmektedir. Ön terbiye ve boyama gibi sulu prosesler içerdikleri yüksek orandaki kimyasaldan dolayı suyu önemli miktarda kirletmektedir. Kirletilmiş bu suyun arıtılması hem çevre açısından hem de ekonomik olarak birçok soruna yol açmaktadır. Dolayısıyla terbiye işlemleri için yenilikçi prosesler her geçen gün önemini arttırmaktadır. Kimyasal ve su kullanımının azaltılmasına yönelik yapılan uygulamaların ana hedefi çevreci yöntemleri geliştirmektir. (Eren 2007, Eren 2021b, Van Der Kraan, 2005).

Poliester, sentetik lifler kategorisinde en geniş kullanım alanına sahip lifdir. Poliester lifinin sahip olduğu yüksek yoğunluktaki kristalin ve düşük yoğunluktaki amorf bölgeler, boyarmaddeler ile kimyasal bağ oluşturabilecek fonksiyonel grupların bulunmaması ve yüksek hidrofobik yapı, lifin boyanabilirliğini etkilemektedir. Liflerin homojen olarak boyanabilmesi için; uygun boyarmadde seçiminin yanında, lif yapısının da açılması gerekmektedir. Bu sebeple lif yapısının açılabilmesi için yüksek sıcaklıklarda çalışılması (HT, termosol), küçük moleküllü boyarmaddeler ve carrier ile boyama gibi yöntemler uygulanmaktadır. Ancak bu işlemlerin hepsinde yüksek su ve kimyasal kullanımı söz konusudur (Karadağ 2022).

Tekstilde boyama işlemleri sırasında kullanılan su ve kimyasalı azaltmaya yönelik çalışmalar son yıllarda çok önem kazanmıştır. Bu nedenle boyarmaddenin çözülebilmesi için su yerine süperkritik karbondioksit ($scCO_2$) ortamının kullanılması, su tüketimini ve su kirliliğini bertaraf etmek için kullanılan yenilikçi çalışmalar arasındadır. Süperkritik akışkan teknolojisi; temizleme, ağartma, boyama ve terbiye gibi pek çok tekstil prosesi için araştırılmaktadır (Zheng ve diğ. 2017; Van der Kraan ve diğ. 2007, Eren ve diğ. 2018, Malm ve diğ. 2019, Eren ve diğ. 2020). Sentetik lifler sahip oldukları apolar yapıdan dolayı süperkritik karbondioksit ortamında uygun boyarmaddelerle kolaylıkla boyanabilmektedirler. Poliamid, Politrimetilen tereftalat (PTT), Poli bütülen tereftalat (PBT), Polipropilen (PP), Polilaktik asit (PLA) gibi birçok sentetik elyaf susuz $scCO_2$ ortamda boyanabilmektedir. Ancak özellikle poliester lifleri süperkritik ortamda başarılı bir şekilde boyanabilmektedir. (Eren ve diğ. 2020, Yiğit ve diğ. 2021a). Süperkritik karbondioksit ortamında susuz boyama işleminin genel akış diagramı Şekil 1'de gösterilmektedir (Eren 2020, Yiğit, 2021a).



Şekil 1:

Sulu (klasik) proses ve susuz (süperkritik karbondioksit ortam) prosesinin işlem akışı
(Bach ve diğ. 2002)

Tablo 1'de klasik sulu boyama ile $scCO_2$ ortamında susuz boyamanın karşılaştırılması verilmiştir. $ScCO_2$ ortamında poliester boyamanın en önemli özelliklerinden biri dispersiyon

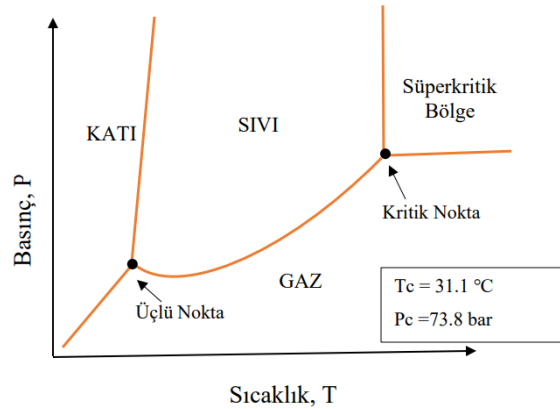
ajanları gibi yardımcı kimyasallara gerek kalmamasıdır. Karbondioksit polar olmayan bir çözücü olduğundan dispers boyarmaddeler dispersiyon ajanının kullanımına gerek kalmadan çözülebilirler. Karbondioksit ekonomik, toksik ve yanıcı olmayan, çevreci ve farklı koşullarda kimyasal açıdan atıl bir gazdır. Poliester liflerinin sulu ortam (klasik) yerine susuz scCO₂ ortamda boyanabilmesi tekstil boyamacılığında kullanılan su ve kimyasalı azaltma açısından önemli bir procestir.

Tablo 1. Klasik sulu boyama ile scCO₂ ortamda susuz boyamanın karşılaştırılması (Muthu ve Gardetti, 2020).

Geleneksel sulu boyama	Süperkritik CO ₂ boyama
Çok miktarda atık su üretir (boyarmadde ve diğer kimyasallar içerir)	Su ve kimyasal kullanılmaz dolayısıyla atık yükü yoktur
Kimyasal geri dönüşüm çok zordur	Geri dönüşümün uygulanabilirliği yüksektir
Tüm boyama işlemi ~4-6 saat sürer	Boyama hızla gerçekleşir (~2saat yeterlidir)
Boyarmadde verimliliği çok zayıf (~%60-85)	Boyarmadde kullanımı ~%99
Daha fazla zaman aldığı için çok fazla enerji gerekir	Daha az enerji gerekir
Yatırım daha düşüktür, ancak işletme maliyeti daha yüksektir	Büyük bir yatırım gerekli, ancak süreç maliyeti düşük

Bir süperkritik akışkanın yoğunluğu, bir sıvının yoğunluğu ile yaklaşık olarak aynı iken bir gazın yoğunluğundan yaklaşık olarak 200-400 kat daha fazladır. Bu yüksek yoğunluk özelliği ile süperkritik akışkanlar, makromolekülleri ve uçucu olmayan molekülleri çözme konusunda daha başarılı olmaktadır. Ayrıca süperkritik akışkanların viskozitelerinin düşük olması ve yüksek difüzyon katsayıları nedeniyle sıvı çözücülere kıyasla kütle transfer performansının daha yüksek olmasını sağlamaktadır (Karadağ 2022).

Şekil 2.'de karbondioksitin (CO₂) sıcaklığa (T) ve basınca (P) göre evreleri verilmiştir. Karbondioksit kritik noktanın üzerinde hem sıvı hem de gaz özelliklerine sahiptir. Sıcaklık ve basınç arttıkça, sıvı ve gaz fazı birleşir ve süper kritik bir akışkan fazına dönüşür.



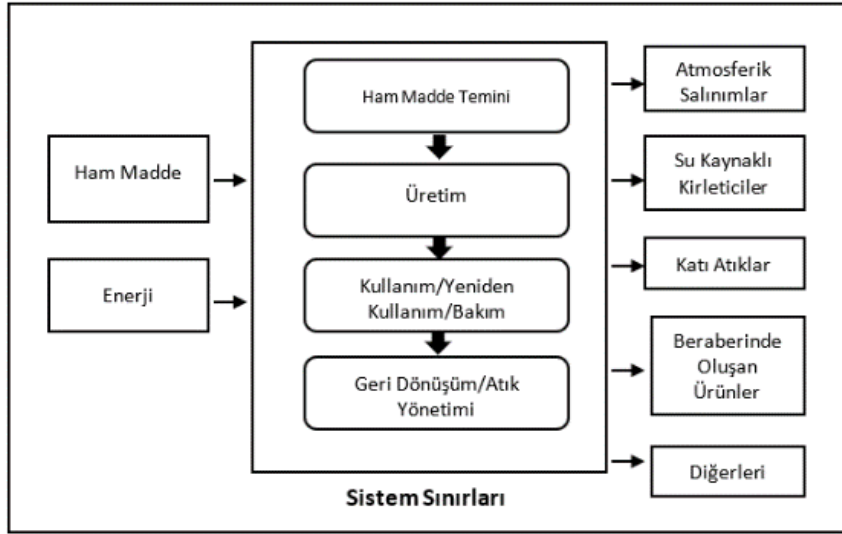
Şekil 2:

Karbondioksitin (CO₂) sıcaklığa (T) ve basınca (P) göre evreleri (Johannesson, C. 2016).

Süperkritik ortamda yoğunluk basınç ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Değişen yoğunluk değerleri ve yüksek difüzyon katsayısı sayesinde reaksiyon hızlıca gerçekleşmektedir

(Çolak ve Tülek, 2003). Süperkritik akışkanın düşük viskoziteye sahip olması, akışkanın lifin içine daha kolay nüfuz etmesini sağlamaktadır. Bu ortamda boyarmaddenin life penetrasyonu sulu ortamdakinden çok daha fazladır. Hızlı kütle transferi sayesinde boyama verimliliği oldukça artmaktadır (Devrent ve diğ. 2006).

ScCO₂ ortamı, tekstil ürünlerinin kimyasal olarak işlenmesi için sürdürülebilir bir çözücüdür ve poliesterin boyanmasında avantajları vardır (Montero ve diğ. 2000, Banchero, 2013). Toksik olmaması ve sürdürülebilir olması özellikle sera gazı etkisini ortadan kaldırmaktadır. Süperkritik ortamda susuz boyama prosesinden sonra çözücü olarak kullanılan CO₂'yi uzaklaştırmak kolaydır. Aynı zamanda sıcaklık ve basınca bağlı olarak çözücünün yoğunluğu değiştirilebilir. Süperkritik CO₂, pek çok polar özellik göstermeyen ve düşük moleküllü boyarmadde için iyi bir çözücüdür ve bu özelliğinden tekstil boyamacılığı faydalanabilmektedir. Çünkü klasik sulu prosese kıyasla scCO₂'de susuz olarak yapılan işlemler difüzyonun daha hızlı olmasını ve kütle transfer direncinin daha düşük olması nedeniyle boyarmaddenin life penetrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Penetrasyonun daha hızlı olması sayesinde boyama işlemi daha kısa sürede tamamlanmaktadır. Proses içinde su olmadığı için işlem sonrası kurutma adımına gerek yoktur, dolayısıyla enerji verimliliği bakımından etkilidir. Boyanın hidrolize olmaması nedeniyle boyarmadde moleküllerinin hepsi life karşı etkilidir dolayısıyla susuz boyama işleminde gereken boya konsantrasyonunun, klasik sulu boyamadan daha az olması beklenmektedir. Süperkritik karbondioksit ile yapılan susuz boyamada çözücü olarak kullanılan CO₂, ortamdaki basınç düşürülerek uzaklaştırılabilir. Uzaklaştırılan CO₂ ve boyarmadde miktarında küçük kayıplar olsa da yeniden kullanılabilir olması işlemin çevre dostu ve daha ekonomik olmasının temel sebepleridir (Bach ve diğ. 2002; Hendrix, 2001).



Şekil 3:

LCA'nın aşamaları (Demirer, 2011a)

Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assessment: LCA), ürün, süreç veya hizmet için kullanılan enerjinin, hammaddenin, atık ve emisyonların çevre bakımından etkilerinin yanında doğal kaynakların tüketimi ve çevresel etkileri değerlendirmek için kullanılan bir metottur (Dikbaş 2019). LCA'nın aşamaları Şekil 3'de verilmiştir. Yaşam döngüsü analiz yöntemlerinin en önemli özelliği karar veren değil, verilen kararların desteklendiği yönde çalışan bir mekanizma olmasıdır. Bu analiz yöntemi üzerinde çalışılırken, sürdürülebilirlik konusunda destekleyici bir yöntem olması bakımından firmaların LCA analizi ve başka yöntemler kullanılarak ekolojik anlamda gelişme gösterebilmesi tavsiye edilmektedir. Yaşam döngüsü

değerlendirmesinde bir ürünün, sürecin veya hizmetin çevreye yönelik mevcut etkisini tespit etmeye yönelik sistematik olarak bir dizi prosedür ve standartlar kullanılmaktadır. LCA, ISO 14040:2006 standardına göre dört adımdan oluşmaktadır (Moazzem ve diğ. 2018).

LCA analizinin 1. aşamasında; değerlendirilenin amacı, uygulama tasarımı, araştırma yapmadaki gerekçesi ve hedef kitle sorgulanamaz net bir şekilde ortaya konulmalıdır. 2. aşamadaki envanter analizi; çalışılan sistem için gereken sınırların; enerji, su, hammadde kullanımı ile çevresel emisyonlar şeklinde çizilmesi ile yapılır. Emek ve zaman alan asıl bölüm burasıdır çünkü verilerin toplanması ve analizi bu aşamada yapılmaktadır. Bu bölümde ham veriler toplandığı ve analiz edildiği için zaman ve emek bakımından performans gerektiren bir bölümdür. Etki değerlendirmesi yaşam döngüsü analizinin 3. aşamasıdır. Envanter analizi ile elde edilen verilerin, çevresel etkisinin değerlendirilmesine yönelik ilkeleri kapsamaktadır. Kategori tanımlama, sınıflandırma, karakterizasyon ve değerlendirme/ağırlıklandırma ana konularını kapsamaktadır. 4. aşama olan yorumlamada, 2. aşama olan envanter analizi ve 3. aşama olan etki değerlendirmesinin sonuçlarının yorumlanmasıdır. Sonuçlar neticesinde tercih edilen ürün, süreç ve hizmet seçilmektedir (Demirer 2011b, Gündüz ve diğ. 2012).

Bu çalışmada, süperkritik karbondioksit (scCO₂) ortamda susuz ve klasik sulu ortamda % 100 poliester dokuma kumaş açık ve koyu tonda olmak üzere boyanmış, boyama proseslerinin aşamaları her iki ortam için de yaşam döngüsü analizi (LCA) yöntemi ile değerlendirilmiştir. Veriler; enerji, su tüketimi ve çevresel etkiler olarak kategorize edilerek değerlendirilmiştir. Malzemelerin taşınması, atık su arıtma süreçleri ve atık değerlendirme yöntemleri gibi süreçler çalışma sınırları içinde yer almamıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Materyal

Çalışmada bezayağı dokunmuş % 100 poliester açık ve koyu tonda kumaş boyama verileri kullanılmıştır. Fonksiyonel birim olarak 100 kg kumaş için gerekli proses verileri baz alınmıştır. Kumaşlara uygulanan bitim işlemleri her iki ortamda yapılan boyama yöntemi içinde aynı kabul edilmiştir. Klasik sulu boyama için kullanılan su miktarı 1/8 oranında hesaplanmıştır. Dolayısıyla hesaplamalarda su miktarı 800 l alınmıştır. Tablo 2’de çalışmada kullanılan kumaşın teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan kumaşın teknik özellikleri

Kumaşın Hammaddesi	%100 Poliester
Kumaş Konstrüksiyonu	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

Klasik sulu ve susuz ortamda yapılan boyama prosesi için de kullanılan boyarmadde ve kimyasal yardımcı malzemeler Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Boyama proseslerinde kullanılan boyarmadde ve kimyasal yardımcı malzemeler

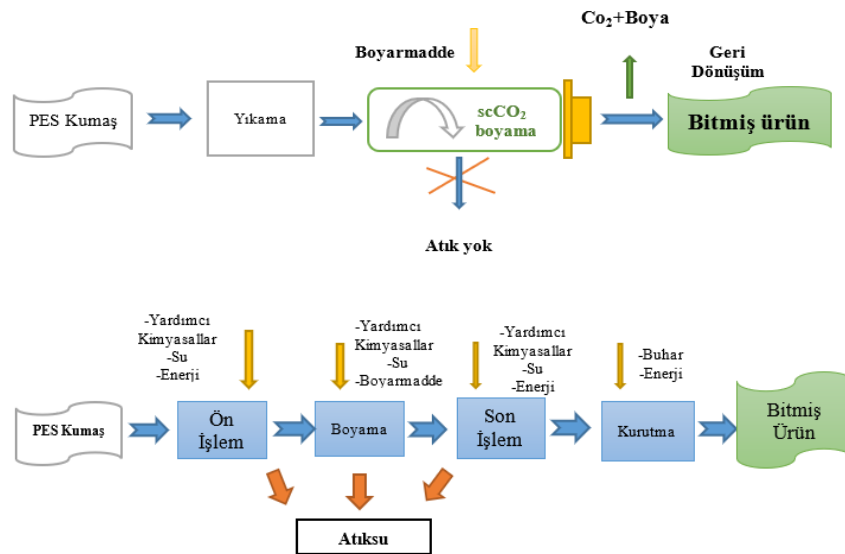
	Klasik jet boyama		Susuz boyama	
	Açık renk	Koyu renk	Açık renk	Koyu renk
Boyarmadde %	1,37	4,34	2,00	2,18
Nötralizasyon asidi	1 g/l	2 g/l	-	-
Egalizatör/Dispergator	1 g/l	1 g/l	-	-
Alkali	1 g/l	5 g/l	-	-
Tampon asit	0,5 g/l	0,5 g/l	-	-
Islatıcı	1 g/l	1 g/l	1 g/l	1 g/l
Alkali Redüktan	-	12 g/l	-	-
Karbondioksit	-	-	316 g/kg	316 g/kg

2.2. Metot

2.2.1. Boyama İşlemleri

Hem klasik sulu hem susuz boyama işlem adımları Şekil 4’de gösterilmektedir. Klasik boyama işleminde Dilmenler marka Jumbo Full Otomatik boyama makinesi kullanılmıştır. Makinenin kapasitesi 150 kg, hacmi 5837 litredir. Makinenin sahip olduğu maksimum sıcaklık 135 °C, maksimum basınç 2.2 Bar’dır.

Çalışmada klasik boyama proses koşulları 130 °C’de 120 dakikadır.



Şekil 4

Süperkritik ve klasik boyama proses akışı (Karadağ 2022)

ScCO₂ ortamındaki susuz boyama 120°C’de, 250 bar basınç ve 90 dakikada yapılmıştır. Şekil 4’de de görüldüğü gibi scCO₂ ortamda susuz boyama işleminden önce noniyonik yüzey aktif madde ile kumaş yüzeyindeki safsızlıkların uzaklaştırılması için yıkama işlemi yapılmıştır.

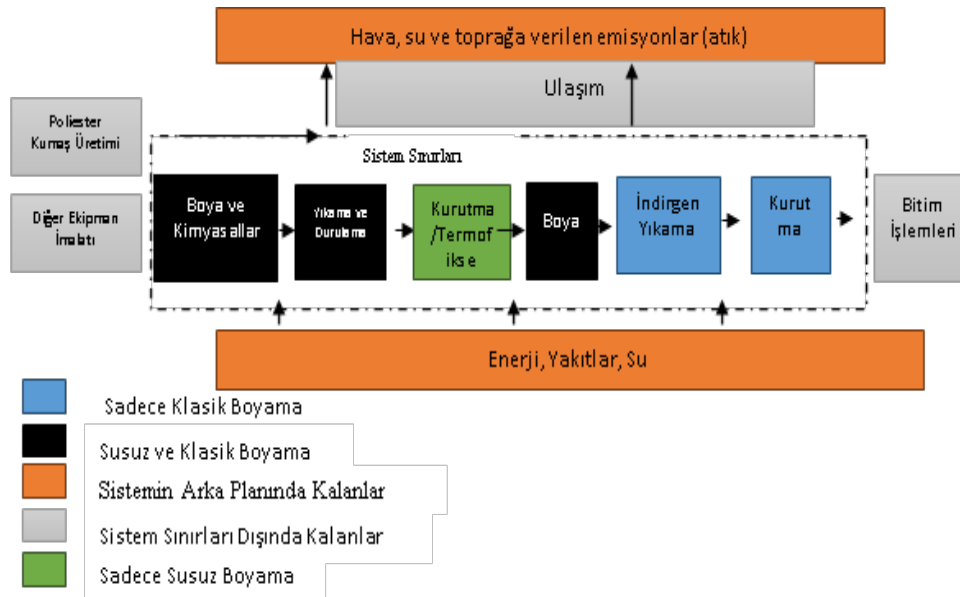
2.2.2. Yaşam Döngüsü Analizinin Uygulanması

Bu çalışmanın kapsamı: iki farklı ortamda yapılan boyama işleminin kapıdan kapıya çevresel karşılaştırması olarak belirlenmiştir. Klasik sulu ortamda yapılan boyama işlemlerinin verileri Bursa Akbaşlar Tekstil A.Ş. firmasından, scCO₂ ortamda yapılan susuz boyama işleminin verileri ise DyeCoo firmasının Tayland'daki bir pilot tesisten elde edilmiştir.

Kumaşların üzerinde bulunan yağ ve kir gibi safsızlıklar, boyama işlemi sırasında lekeleme ile abraja neden olabileceği için ön yıkama işlemine ihtiyaç duyulabilmektedir. Aynı kumaşın hem klasik sulu hem de scCO₂ ortamda susuz boyanacağı göz önünde bulundurulduğunda kumaşlar için yapılması gereken ön yıkama Şekil 1'de gösterilen proses akışına dahil edilerek, analiz yapılmıştır. Dolayısıyla LCA analizi yapılırken susuz boyama öncesi ön yıkama yapıldığı varsayılmıştır. LCA analizindeki sistem sınırlarına dahil edilen ve edilmeyen unsurlar Tablo 4 ve Şekil 5 'de verilmiştir.

Tablo 4. Sistem sınırlarının özeti

Sistem Sınıra Dahil Edilenler	Sistem Sınırdan 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 5

Sistem sınırlarına dahil edilen ve edilmeyenler

Klasik sulu boyama ve scCO₂ ortamda susuz boyama işlemlerinin yaşam döngüsü analizinde ISO 14044 standardı kullanılmıştır. Envanter analizi için üretim prosesindeki girdi ve çıktılar uygun yöntemler ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan ve LCA analizinde yer alan pek çok etki kategorisi Tablo 5’de verilmiştir. Hesaplanan verilerin etki değerlendirmeleri ise CML IA-Temel ve Kümülatif Enerji Talebi yöntemlerine göre SimaPro’da 9.3 yapılmıştır.

Tablo 5. Yaşam döngüsü analizi etki kategorileri (Demirer 2011a)

Etki Kategorisi	Ölçek	LCA veri örnekleri	Karakterizasyon Faktörü	Karakterizasyon faktörünün açıklaması
Küresel Isınma	Küresel	Karbondioksit (CO ₂) Nitrojendioksit (NO ₂) Metan (CH ₄) Kloroflorokarbonlar (CFSc) Hidrokloroflorokarbonlar (HFCFs) Metilbromid (CH ₃ Br)	Küresel ısınma potansiyeli	LCA verisini karbondioksit eşdeğerine dönüştürür. Küresel ısınma potansiyeli farklı sürelerde gerçekleşebilir.
Ozon Tabakasının Tükenmesi	Küresel	Kloroflorokarbonlar (CFSc) Hidrokloroflorokarbonlar (HFCFs) Halonlar Metilbromid (CH ₃ Br)	Ozon tüketimi potansiyeli	LCA verisini trikloroflorometan (CFC-11) eşdeğerine dönüştürür.
Asidifikasyon	Bölgesel Yerel	Sülfüroksitler (SO _x) Nitrojen oksitler (NO _x) Hidroklorik asit (HCL) Hidroflorik asit (NH ₄)	Asidifikasyon potansiyeli	LCA verisini hidrojen iyonu eşdeğerine dönüştürür.
Fotokimyasal Sis	Yerel	Metan olmayan hidrokarbon (NMHC)	Fotokimyasal oksidan oluşturma potansiyeli	LCA verisini metan eşdeğerine dönüştürür
Ötrofikasyon	Yerel	Fosfat (PO ₄) Nitrojenoksit (NO) Nitrojendioksit (NO ₄) Nitratlar Amonyak (NH ₄)	Ötrofikasyon potansiyeli	LCA verisini fosfat eşdeğerine dönüştürür
İnsan toksisitesi	Küresel Bölgesel Yerel	Havaya, suya ve toprağa yapılan toplam salımlar	% 50 Öldürücü erişim LC ₅₀ *	LCA verisini LC ₅₀ eşdeğerine dönüştürür.
Su Kullanımı	Bölgesel Yerel	Su kullanımı veya tüketimi	Su kıtlığı potansiyeli	LCA verisini kullanılan kaynağın miktarına karşın rezervde kalan kaynağın miktarına dönüştürür
Karasal Ekotoksisite	Yerel	Kemirgenlere olan öldürücü derişimi raporlanmış zehirli kimyasallar	% 50 Öldürücü erişim LC ₅₀ *	LCA verisini LC ₅₀ eşdeğerine dönüştürür
Kaynak Tüketimi	Küresel Bölgesel	Kullanılan mineral miktarı Kullanılan fosil yakıt miktarı	Kaynak tüketimi potansiyeli	LCA verisini kullanılan kaynağın miktarına karşın rezervde kalan kaynağın miktarına dönüştürür
Arazi Kullanımı	Küresel Bölgesel Yere	Diğer arazi değişiklikleri veya düzenli bir depolama sahasının kullanılma miktarı	Arazi durumu	Tahmini bir özkütle kullanarak katı atığın kütlelerini hacme dönüştürür.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

ScCO₂ ortamda susuz ve klasik sulu ortamda boyamaya göre karşılaştırmalı girdi ve çıktılar Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Boyama yöntemlerine göre girdiler ve çıktılar

	Klasik Boyama		Susuz Boyama	
	Açık Ton	Koyu Ton	Açık Ton	Koyu Ton
Boyama ve Yıkama				
Elektrik (kWh)	19,25	48,12	111,48	139,26
Buhar (kWh)	422,20	1054,64	183,52	229,63
Su (l)	1653	4132	800	800
Boya (kg)	0,004	1,303	2	2,18
CO ₂ (kg)	0	0	31,66	31,66
Kurutma				
Elektrik (kWh)	11,47	28,67	6,26	6,26
Doğalgaz (kWh)	187,24	468,09	187,24	468,09
Buhar (kWh)	0	0	64,81	64,81
Su (l)	310	777	0	0

ScCO₂ ortamda susuz ve klasik sulu ortamda boyamaya göre karşılaştırmalı kaynak tüketimleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Boyama yöntemlerine göre toplam kaynak tüketimleri

Proses	Elektrik (kWh)	Toplam Su (l)	Buhar (kWh)	Doğalgaz (kWh)
Klasik Boyama Açık Ton	30,71	1963	422,20	187,24
Klasik Boyama Koyu Ton	76,79	4909	1054,64	468,09
Susuz Boyama Açık Ton	117,74	800	248,33	187,24
Susuz Boyama Koyu Ton	145,52	800	294,44	468,09

LCA metodolojisi ile klasik ve susuz boyama teknolojilerinin karşılaştırılması sonucunda, iki teknoloji arasında enerji ve su tüketiminde belirgin farklar görülmektedir. Tablo 7 incelendiğinde ScCO₂ ortamda susuz boyamada, klasik sulu ortama göre enerji tüketiminde görülen farkın ana nedenlerinden biri susuz boyamanın elektrik tüketiminin klasik boyamaya göre daha fazla olmasıdır. Bu durum scCO₂’de boyama sırasında CO₂’in gaz fazdan sıvı faza çevrilmesi ve sonrasında tekrar gaz fazına dönmesi için gerekli enerjiden kaynaklanmaktadır. Fakat toplam enerji tüketimi açısından bakıldığında susuz boyama işleminin klasik sulu ortamda yapılan boyama işlemine göre daha avantajlı olduğu görülmektedir. Klasik sulu ortamda yapılan boyama işlemi ortalama 2-5 saat aralığında tamamlanırken, susuz ortamda yapılan boyama işlemi 1,5 saatte tamamlanmakta ve susuz boyama işleminde kumaşların makineden kuru çıkması da susuz boyamada enerji tüketimi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Çünkü proses süresinin uzunluğu ve kumaşların kurutulması için kullanılan sıcak hava ve artan doğalgaz sarfiyatı ile birlikte toplam enerji tüketimi artmaktadır. Ülkemizde linyit gibi çevresel etkisi yüksek kaynaklardan elde edilen enerji, üretimde çevresel etkinin daha yüksek olma nedenlerindedir. Doğalgaz tüketiminde ise her iki boyama işleminde de renk tonu koyulaştıkça doğalgaz tüketiminin arttığı gözlenmiştir. Beklendiği gibi klasik sulu ortamda harcanan su miktarı susuz ortamdakinden fazladır hatta koyu renk boyamalarda bu miktarın daha da arttığı görülmüştür.

3.1 Çevresel Etkilerin Karşılaştırılması

ScCO₂ ortamda susuz ve klasik sulu ortamda boyama teknolojilerinde hesaplanan çevresel etkiler Şekil 6 ve Tablo 8’de verilmiştir.

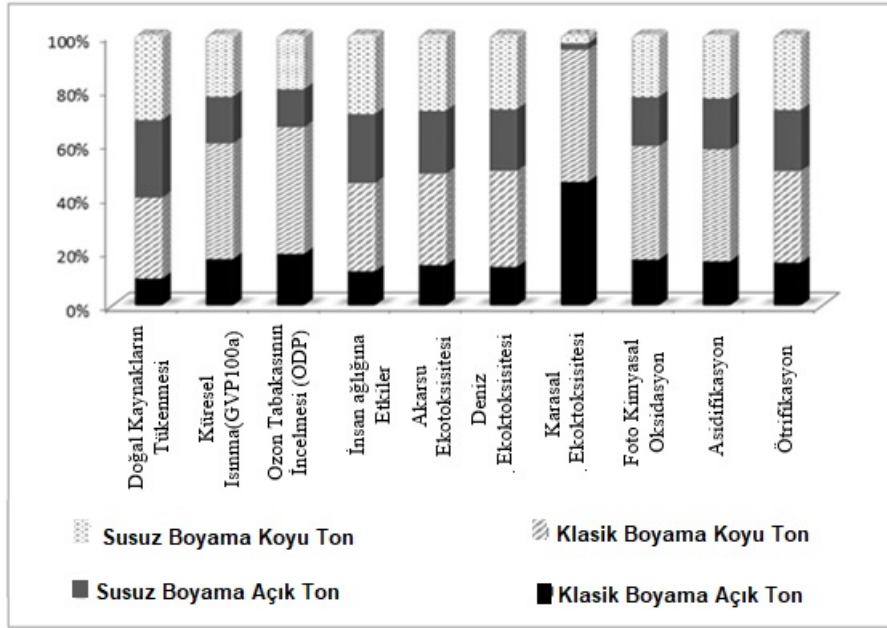
Doğal kaynakların tükenmesi, insan sağlığına ve çevreye olan etkiler incelendiğinde her iki ortamda yapılan açık renk boyama işleminin daha çevre dostu olduğu sonucu elde edilmiştir. Aynı zamanda akarsu ve deniz ekotoksitesisi, ötrofikasyon açısından etkiler incelendiğinde, klasik sulu ortamda yapılan koyu ton boyamaların çevresel etkilerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Fotokimyasal oksidasyon ve asidifikasyon kategorilerinde renk tonu koyulaştıkça çevresel etki değerlerinin klasik sulu boyamada, susuz boyamadan fazla olduğu söylenebilir.

Tablo 8. Boyama yöntemlerine göre çevresel etkilerin sayısal verileri

Etki Kategorisi	Klasik Boyama		Susuz boyama	
	Açık Ton	Koyu Ton	Açık Ton	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)	0,0000172	0,0000423	0,0000127	0,0000181
İnsan Sağlığına Etkiler (kg 1,4-DB eq)	54,140394	139,80887	109,54598	125,31001
Akarsu Ekotoksitesisi (kg 1,4-DB eq)	47,794447	108,37328	74,605334	89,809936
Deniz Ekotoksitesisi (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

Küresel ısınma etkisi, ozon tabakasının incelməsi gibi çevresel etkiler incelendiğinde susuz boyamanın klasik boyamaya göre daha çevreci olduğu görülmektedir. Tablo 8’de klasik boyama prosesinin karasal ekotoksitesisi incelendiğinde ise susuz boyama prosesine göre etkisinin çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Karasal ekotoksitesite etkisinin önemli bir kısmı boyama sonrası yapılan sabunlu yıkama işleminden kaynaklanmaktadır. Yıkama işlemi klasik ve susuz boyama için aynı şartlarda yapılmamaktadır. Susuz boyama prosesinde sadece boyama öncesi kumaş üzerindeki safsızlıkları uzaklaştırmak için non-iyonik deterjanla yıkama yapılırken, klasik sulu boyama prosesinde kumaşa tutunamayan boya ve kimyasalları uzaklaştırmak için de yıkama işlemi tekrarlanabilmektedir.

Ayrıca karasal toksitesite etkisinin sadece elyaf, deterjan ya da su tüketimi bazında değil aynı zamanda elektrik kullanımından kaynaklı olduğu da görülmektedir. Çünkü günümüzde çoğu proste gereklili olan elektrik enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları yerine tükenen doğal kaynaklardan sağlandığından etki kategorisindeki çoğu başlığı olumsuz etkilemektedir.



Şekil 6

Boyama yöntemlerine ve tonlara göre çevresel etkilerin karşılaştırılması

4. SONUÇ

Çalışmada poliester kumaşların boyanmasında yaygın olarak tercih edilen klasik sulu boyama ile günümüzde fazla su tüketimine alternatif olarak kullanılmaya başlanan yenilikçi işlemlerden süperkritik ortamda susuz boyama teknolojisi LCA analizi ile kıyaslanmıştır. Analizde enerji, kimyasal ve su gibi hammadde tüketimleri ile çevresel etkiler karşılaştırılmıştır.

Tüm prosesler bazında inceleme yapıldığında süperkritik karbondioksit ortamda susuz boyamanın daha avantajlı olduğu kümülatif sonuçlardan da görülmektedir. Bu sonuç yakın zamanda bu konuda Johannesson (2016) ve Eren ve diğ.(2020) tarafından yapılmış çalışmalarla uyumludur.

Hem susuz hem de klasik sulu ortamda yapılan boyamalarda koyu renk tonlarda ekstra su, enerji ve kimyasal kullanımının açık tonlara göre daha fazla olduğu görülmüştür.

LCA analizinde kümülatif etkinin yüksek çıkmasındaki en büyük etken elektrik enerjisi kullanımı olduğundan özellikle gelecekte elektrik enerjisinin yenilenebilir yeşil enerji kaynaklarından elde edilmesi susuz üretim prosesini daha da avantajlı hale getirecektir.

Ayrıca çalışma göstermiştir ki hem doğal hem sentetik lifleri susuz ortamda boyamak için yöntemler geliştirmek gelecek için önemli olacaktır. Bunun yanı sıra üreticilere ve nihai kullanıcı olan tüketicilere sağlık ve çevrenin korunması amacıyla açık tonlarda boyanmış ürünlerin seçilmesi önerilebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Çalışmanın yazarlarından Semiha EREN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama ayrıca eleştirel inceleme ve makale yazımı aşamalarında, İdil YİĞİT veri toplama, veri analiz ve yorumlama, eleştirel inceleme ve makale tasarımı konularında, Neslihan KARADAĞ literatür taraması, veri toplama, işleme ve analizinde ve makale tasarımında, Hüseyin Aksel EREN: çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, eleştirel inceleme ve makale kontrol kısımlarında katkı sağlamıştır. Çalışmanın son onay ve tam sorumluluğunu tüm yazarlar üstlenmektedir.

KAYNAKLAR

1. 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.
doi.org/10.1111/j.1478-4408.2002.tb00253.x
2. Banchemo, M. (2013). Supercritical fluid dyeing of synthetic and natural textiles—a review. *Coloration Technology*, 129(1), 2-17. Banchemo, 2013, s. 2-17.
doi.org/10.1111/cote.12005
3. Çolak, N., Tülek, Y. (2003). Süperkritik akışkan ekstraksiyonu. *Gıda*, 28(3).
4. 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-veuygulama-ornekleri.html>
5. 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*.
6. Devrent, N., ÖZCAN, A. S., Durur, G. (2006). Süperkritik karbon dioksitte boyama. *Tekstil ve Mühendis*, 13(63), 44-48.
7. Dikbaş, F., & Mezarciöz, S. (2019). Tekstilde Yaşam Döngüsü Analizi. *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, (38), 107-113.
8. Eren, H. A. (2007). Simultaneous afterclearing and decolorisation by ozonation after disperse dyeing of polyester. *Coloration Technology*, 123(4), 224-229.
doi.org/10.1111/j.1478-4408.2007.00087.x
9. Eren, H. A., Yiğit, İ., Eren, S., Avinc, O. (2020). Sustainable textile processing with zero water utilization using super critical carbon dioxide technology. In *Sustainability in the Textile and Apparel Industries* (pp. 179-196). Springer, Cham.
doi.org/10.1007/978-3-030-38545-3_8

10. Eren, S., Avinc, O., Saka, Z., Eren, H. A. (2018). Waterless bleaching of knitted cotton fabric using supercritical carbon dioxide fluid technology. *Cellulose*, 25(10), 6247-6267.
doi.org/10.1007/s10570-018-2004-z
11. Gündüz Balpetek, F., Alay, E., & Özdoğan, E. (2012). Sürdürülebilir kalkınma için yaşam döngüsü değerlendirmesi ve tekstil sanayi etkisi. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(2), 28-40.
12. Hendrix, W. A. (2001). Progress in supercritical CO₂ Dyeing. *Journal of Industrial Textiles*, 31(1), 43-56.
doi.org/10.1106/9Q7V-KMGU-BCM-1FL3
13. Johannesson, C. (2016). Emerging Textile Production Technologies-Sustainability and feasibility assessment and process LCA of supercritical CO₂ dyeing (Master's thesis).
14. Karadağ, N. (2022). Poliesterin boyanmasında susuz ve klasik proseslerin yaşam döngüsü analizi (Master's thesis, Bursa Uludağ Üniversitesi).
15. Malm, V., Tadesse Abate, M., Seipel, S., & Nierstras, V. (2019). Supercritical Carbon Dioxide: A Sustainable Medium For Textile Dyeing And Finishing To Expand The Possibilities For A Resource Efficient Production Technology. *In Autex 2019 World Textile Conference*, Ghent, June 11-15, 2019.
16. 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.
doi.org/10.1080/00405000.2018.1434113
17. 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.
doi.org/10.1021/ie0002475
18. Muthu, S. S., & Gardetti, M. Á. (Eds.). (2020). Sustainability in the Textile and Apparel Industries: Production Process Sustainability. *Springer Nature*.
doi.org/10.1007/978-3-030-38545-3
19. 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.
doi.org/10.1016/j.supflu.2006.07.019
20. Yiğit, İ., Eren, S., Karalı, R., Yıbar, M. F., & Eren, H. A. (2021b). Comparison of the colour fading effects of sodium hypochlorite and ozone treatments. *Coloration Technology*, 137(6), 615-624.
doi.org/10.1111/cote.12554

Eren S., Karadağ N., Yiğit İ., Eren H.S.: Süperkritik ve Klasik ort. Poliester Boyamanın YDA ile Değerlendirme.

21. Yiğit, İ., Eren, S., Özcan, H., Avinc, O., Eren, H. A. (2021a). An investigation of process parameters on colour during the dyeing of polyester in supercritical carbon dioxide media. *Coloration Technology*, 137(6), 625-644.
doi.org/10.1111/cote.12553
22. 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.
doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.115