



TAM KAPALI ORGANİK ÇÖZGENLİ VE SULU KUMAŞ YIKAMA SİSTEMLERİNİN EKONOMİK VE ÇAPRAZ MEDYA ETKİ ANALİZİ

Meltem BALKAN^{1*}, Emrah ÖZTÜRK², Mehmet KİTİS¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Aksu Mehmet Süreyya Demiraslan Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Çözgen Sistem, Çapraz Medya Etki Analizi, Ekonomik Analiz, Sulu Sistem, Tekstil.</i>	Kumaş yıkama proseslerinde genellikle sulu sistem ve çözgen sistem olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Bu çalışmada kumaş yıkama proseslerinde kullanılan sulu ve çözgen sistemler Ekonomik ve Çapraz Medya Etkiler Referans Dokümanında sunulan metodolojiden faydalanılarak analiz edilmiştir. Kumaş yıkama sistemleri çapraz medya metodolojisine göre beş farklı çevresel temada karşılaştırılmıştır. Sulu sistemin çözgen sisteme göre beşeri toksisite potansiyeli (BTP), küresel ısınma potansiyeli (KIP), asidifikasyon potansiyeli (AP) ve fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli (FOOP) değerlerinde sırasıyla 1,24, 1,22, 1,24 ve 1,23 kat daha fazla çevresel etkiye neden olduğu görülmüştür. Akuatik toksisite potansiyeli (ATP) açısından çözgen sistemin %100 daha düşük çevresel etkiye sahip olabileceği hesaplanmıştır. Maliyetleme metodolojisine göre ekonomik açıdan değerlendirilen sulu ve çözgen sistemin toplam yıllık maliyetleri sırasıyla 0,34 ve 0,29 USD/kg ürün olarak bulunmuştur. Maliyetleme metodolojisinden elde edilen sonuçlar çözgen sistemin %17 daha verimli olduğunu göstermiştir. Çözgen sistemin net bugünkü değer hesabında, indirgeme oranının %20 olduğu varsayılmıştır. Buna göre sistemin net bugünkü değeri 10.531 USD, yatırımın iç verim oranı ise %26 olarak bulunmuştur.

ECONOMIC AND CROSS-MEDIA IMPACT ANALYSIS OF FULLY CLOSED ORGANIC SOLVENT AND AQUEOUS FABRIC WASHING SYSTEMS

Keywords	Abstract
<i>Aqueous System, Cross Media Effect Analysis, Economics Analysis, Solvent System, Textile.</i>	Two methods are generally used in fabric washing processes, namely the aqueous system and the solvent system. In this study, the aqueous and solvent systems used in fabric washing were analyzed using the methodology presented in the Economic and Cross-Media Effects Reference Document. Alternative fabric washing systems were compared in five different environmental themes according to the cross-media methodology and it was found that the aqueous system caused 1.24, 1.22, 1.24, and 1.23 times more environmental impact than the solvent system in terms of human toxicity (HTP), global warming (GWP), acidification (AP), and photochemical ozone creation potentials (POCP) values, respectively. In addition, it was calculated that the solvent system could have almost 100% lower environmental impact in terms of aquatic toxicity potential (ATP) value. The total annual costs of the aqueous and the solvent systems, which were evaluated economically according to the costing methodology, were found to be 0.34 and 0.29 USD/kg product, respectively. The results from the costing methodology showed that the solvent system was 17% more efficient. In the net present value calculation of the solvent system, the reduction ratio was assumed to be 20%. Accordingly, the total net present value of the system was found to be 10,531 USD and the internal rate of return on the investment was found as 26%.

Alıntı / Cite

Balkan, M., Öztürk, E., Kitis, M., (2024). Tam Kapalı Organik Çözgenli ve Sulu Kumaş Yıkama Sistemlerinin Ekonomik ve Çapraz Medya Etki Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 109-117.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Balkan, 0000-0001-7790-775X
E. Öztürk, 0000-0001-6421-6474
M. Kitis, 0000-0002-6836-3129

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	26.10.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	03.02.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	05.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: meltembalkan@gmail.com, +90-246-211-1298

ECONOMIC AND CROSS-MEDIA IMPACT ANALYSIS OF FULLY CLOSED ORGANIC SOLVENT AND AQUEOUS FABRIC WASHING SYSTEMS

Meltem BALKAN^{1†}, Emrah ÖZTÜRK², Mehmet KİTİS¹,

¹ Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey

² Department of Environmental Protection Technologies, Aksu Mehmet Sureyya Demiraslan Vocational School, Isparta University of Applied Sciences, Isparta, Turkey

Highlights

- Aqueous and organic solvent systems used in textile fabric washing were compared according to the Economic and Cross-Media Effects (ECM) Reference Document
- The aqueous system caused 1.24, 1.22, 1.24, and 1.23 times more environmental impact than the solvent system in human toxicity (HTP), global warming (GWP), acidification (AP), and photochemical ozone creation potentials (POCP) values, respectively and the solvent system could have almost 100% lower environmental impact in terms of aquatic toxicity potential (ATP) value
- The costing methodology showed that the solvent system is 17% more efficient than the aqueous system

Purpose and Scope

The main purpose of this study was to analyze both fabric washing systems from economic and environmental aspects and to present a practical application of the methodology presented in the ECM BREF Document.

Design/methodology/approach

The ECM Reference Document presents a methodology in terms of different environmental themes and economics for evaluating and/or comparing BAT alternatives. The main environmental themes evaluated within the ECM Reference Document are HTP, ATP, GWP, AP, eutrophication potential (EP), ozone layer depletion potential (ODP), and POCP. The presented economic analysis methodology involves the real prices, total annual costs, net present values (NPV), and internal rate of return (IRR) of alternative BAT options.

Findings

HTP, ATP, GWP, AP, EP, and POCP values of the aqueous system were found to be 5.56×10^{-4} kg Pb eq., 9×10^3 m³, 1.32 kg CO₂ eq., 7.90×10^{-3} kg SO₂ eq., 1.98×10^{-1} kg PO₄ eq., 1.27×10^{-3} kg C₂H₄ eq., respectively. Also, HTP, ATP, GWP, AP, and POCP values of the solvent system were found to be 4.49×10^{-4} kg Pb eq., 1.09×10^{-5} m³, 1.08 kg CO₂ eq., 6.39×10^{-3} kg SO₂ eq., 1.04×10^{-3} kg C₂H₄ eq., respectively. Cross-media effects results showed that the solvent system was more efficient than the aqueous system in each environmental theme. The total annual costs of the aqueous and the solvent systems were found to be 0.34 and 0.29 USD/kg product, respectively. The costing methodology showed that the solvent system is 17% more efficient than the aqueous system. Thus, in terms of both environmental and economic aspects, the solvent system should be preferred over the aqueous system.

Originality

This paper contributes to the decision-making process for BATs as a practical application of the ECM Reference Document. It will serve as a guide to the practical application of ECM analysis for decision-makers, facilities and other researchers.

[†] Corresponding author: meltemmbalkan@gmail.com, +90-246-211-1298

1. Giriş (Introduction)

Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü Direktifi (Integrated Pollution Prevention and Control-IPPC), endüstriyel tesislerden kaynaklanan kirliliğin doğrudan kaynağında önlenerek ve/veya azaltılarak yüksek düzeyde bir çevre korunmasının sağlanması amacıyla 1996 yılında yayımlanmıştır (Doğan, 2008). IPPC Direktifi temelde, Avrupa'daki endüstriyel kaynaklı zararlı emisyonların, yeterli bir çevre koruma düzeyine indirilmesi mevcut en iyi tekniklerin (MET) uygulanması ile sağlamaktadır (Cikankowitz ve Laforest, 2013). MET'ler, genel olarak alternatif tekniklerin sağlayacağı çevresel faydaların ve ekonomik değerlendirmenin ardından belirlenen teknikler olarak tanımlanmaktadır. IPPC Direktifinin Ek 1'i kapsamındaki tesislerin, işletme izni alabilmeleri ve/veya çevresel performanslarını optimize edebilmeleri amacıyla işletmeye uygun MET'leri uygulayarak belirtilen yükümlülükleri yerine getirmeleri gerekmektedir (ÇŞİDB, 2023). Ancak, bu yükümlülükler yedi ayrı direktife dayanmakta olduğu için işletmeler açısından zorluk oluşturmaktadır (Demirel, 2019). Bu nedenle IPPC direktifinin yerini, MET'lerin rolünü genişleten ve güçlendiren Endüstriyel Emisyonlar Direktifi (Industrial Emission Directive-IED) almıştır (Evrard vd., 2016). Avrupa Komisyonu IPPC Bürosu tarafından, IPPC-IED Direktifi'nin ve MET'lerin endüstriyel tesislere uyumunu kolaylaştırmak adına çeşitli sektörel referans dokümanlar (BREF) yayımlanmıştır (Forés vd., 2013; Öztürk vd., 2016). 2006 yılında yayımlanan Ekonomik ve Çapraz Medya Etkiler (ECM) Referans Dokümanı da bu dokümanlardan birini oluşturmaktadır. ECM Dokümanı ile MET'lerin gerek çevresel gerekse ekonomik sonuçları değerlendirilmekte ve böylece endüstriyel tesisler özelinde MET'lere karar verme sürecinin kolaylaştırılması hedeflenmektedir (EC, 2006). ECM Referans Dokümanı temel olarak; (i) çapraz medya, (ii) maliyetleme, (iii) alternatiflerin değerlendirilmesi ve (iv) sektördeki ekonomik uygulanabilirlik olmak üzere dört temel metodolojiden oluşmaktadır (EC, 2006). ECM Referans Dokümanında çevresel etkiler, beşeri toksisite potansiyeli (BTP), akuatik toksisite potansiyeli (ATP), küresel ısınma potansiyeli (KIP), asidifikasyon potansiyeli (AP), ötrofikasyon potansiyeli (ÖP), ozon tabakası incelleme potansiyeli (OTİP) ve fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli (FOOP) olmak üzere yedi farklı temada değerlendirilmektedir (Cakir vd., 2020).

Kumaş yıkama proseslerinde genellikle sulu sistem ve çözgen sistem olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır (EC, 2003). Organik çözgenler, kumaş yıkama proseslerindeki teknik ve kalitatif problemlerin çözümünde suya göre daha avantajlıdır. IPPC Tekstil BREF'inde, çözgen sistemlerde yaygın olarak kullanılan perkloroetilenin (PER), özgül ısısının, buharlaşma gizli ısısının ve yüzey geriliminin sudan daha düşük olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, buharlaşma için gerekli ısının da %90 daha az olduğu belirtilmektedir. Tüm bunlar çözgen sistemlerin kurutma sırasında hızlı ve ucuz buharlaşma ile zaman ve enerjiden tasarruf sağladığını gösterirken; liflere de daha hızlı tutunmasını ve nüfus etmesini sağlamaktadır (EC, 2003). Öte yandan çözgen sistemlerdeki PER kullanımının insanlar ve çevre üzerinde önemli problemlere neden olabileceği de bildirilmektedir (EC, 2003).

Bu çalışmada, kumaş yıkama proseslerinde kullanılan sulu ve çözgen sistemlerin ECM Referans Dokümanında sunulan metodoloji esas alınarak ekonomik ve çevresel açılardan analiz edilmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda ECM Referans Dokümanında sunulan çapraz medya metodolojisine göre ilk olarak çalışmanın sistem sınırları belirlenmiştir. Ardından, kumaş yıkama sistemlerinin çevresel etkileri; BTP, ATP, KIP, AP, ÖP, OTİP ve FOOP olmak üzere yedi farklı çevresel temada karşılaştırılmıştır. ECM dokümanında sunulan maliyetleme metodolojisine göre her iki sistemin toplam yıllık maliyetleri hesaplanarak, net bugünkü değer (NBD) ve iç verim oranı (İVO) belirlenmiştir. Bu çalışmada incelenen kumaş yıkama sistemleri ekonomik ve çapraz medya etkiler açısından yazarların bilgi birikimine göre ilk kez bu detayda analiz edilmiştir. Bu yönüyle çalışma özgün değerlere sahiptir. Ayrıca bu çalışma ECM Referans Dokümanının pratik bir uygulaması olarak MET'lere ilişkin karar verme sürecine katkıda bulunmaktadır. Bu çalışma, temiz üretim uygulamalarındaki MET'lere karar verme süreçlerinde karar vericilere ve diğer araştırmacılara ECM analizinin pratik uygulamasını sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Çapraz Medya Etkilerin Hesaplanması (Calculation of Cross-Media Effects)

ECM Referans Dokümanında potansiyel çevresel etkiler temelde yedi farklı çevresel temada (BTP, KIP, ATP, AP, ÖP, OTİP ve FOOP) değerlendirilmektedir (Cakir vd., 2020). Bu çevresel temalar, kirleticilerin neden olma olasılığı en yüksek çevresel etkilere dayanmaktadır. Ayrıca, değerlendirilen alternatif seçeneklerin kendi özelinde neden olabileceği spesifik bir çevresel tema bulunması durumunda, ilgili çevresel tema da değerlendirmeye katılabilmektedir. Böylece hem farklı kirleticilerin birbirleriyle karşılaştırılması hem de kirleticilerin bir araya getirilerek toplam çevresel etki olarak ifade edilmesi sağlanmaktadır (EC, 2006). Kimyasallara maruz kalmanın doğrudan solunum yoluyla gerçekleştiği varsayılan BTP'de işçileri bu maruziyet riskinden korumak yüksek önceliklidir (McKone ve Hertwich, 2001; EC, 2006).

ECM Referans Dokümanına göre BTP, kg kurşun (Pb) eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (EC, 006). KIP ise, belirli bir sera gazından kaynaklanan küresel ısınma etkisini, bir kg CO₂'in (toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %75'ini CO₂ oluşturmaktadır) etkisine kıyasla tahmin etmektedir (Lameh, 2022; USEPA, 2022). ECM Referans Dokümanına göre KIP, kg CO₂ eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (EC, 2006). Sucul ortamlara yapılan deşarjların, toksisite eşik değerine ulaşana kadar seyreltilmesi için gerekli su hacmi ATP ile elde edilmektedir. ECM Referans Dokümanına göre ATP, m³ olarak ifade edilmektedir (EC, 2006). Genellikle kükürt dioksit (SO₂), amonyak (NH₃) ve azot oksitler (NO_x) gibi antropojenik hava kirleticilerin neden olduğu çevresel etkiyi hesaplayan AP, kg SO₂ eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (EC, 2006; Kim ve Chae, 2016). ÖP ile, besi elementlerinin (N, P vb.) artmasından kaynaklı tatlı su ve deniz ekosistemlerinde meydana gelen çevresel etki hesaplanmaktadır (EC, 2006; Morelli vd., 2018). ECM Referans Dokümanına göre ÖP, kg fosfat (PO₄³⁻) eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (EC, 2006). CFC-11 eşdeğeri olarak ifade edilen OTİP ile belirli bir zaman periyodu boyunca (genellikle 100 yıllık) ozon tabakası üzerindeki yıkıcı etkiler hesaplanmaktadır (Jungbluth, 2020). FOOP ile atmosfere salınan çeşitli uçucu organik bileşiklerin (UOB) genel etkisi tanımlanmaktadır (Forster vd., 2007). Etilen (C₂H₄), tüm UOB'lerin en güçlü ozon öncülerinden biridir (DEPA, 2022). Bu nedenle FOOP, kg C₂H₄ eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (EC, 2006).

BTP ve ATP değerlerinin hesaplanmasında emisyon kütlesi, ilgili emisyonun toksisite faktörüne bölünerek emisyonu güvenli seviyelere indirgenmesi için gerekli olan hava veya su hacmi elde edilmektedir. KIP, AP, ÖP, OTİP ve FOOP değerlerinin hesaplanmasında ise emisyonun kütlesi ile ilgili emisyonun çarpım faktörü kullanılmaktadır. Böylece emisyonlar eşdeğer bir referans maddeye dönüştürülmektedir (EC, 2006). Çevresel temaların hesaplanması kapsamında varsayımsal bir toplam oluşturmak amacıyla kullanılan formüller aşağıda sunulmaktadır. Kirleticilerin ilgili çevresel temalardaki toksisite faktörleri, ECM Referans Dokümanının eklerinde (ECM Referans Dokümanının; Ek 1'inde BTP, Ek 2'sinde KIP, Ek 3'ünde PNEC, Ek 4'ünde AP, Ek 5'inde ÖP, Ek 6'sında OTİP, Ek 7'sinde FOOP faktörleri ve Ek 14'ünde ADP faktörleri) sunulmaktadır.

$$BTP_{(toplam)} = \sum \left(\frac{\text{Havaya salınan kirletici kütlesi}}{\text{Kirleticinin beşeri toksisite faktörü}} \right) \quad (1)$$

$$ATP_{(toplam)} = \sum \left(\frac{\text{Salınan kirletici kütlesi}}{\text{Kirleticinin PNEC değeri}} \right) \quad (2)$$

$$KIP_{(toplam)} = \sum (KIP_{(kirletici)} \times \text{Salınan kirleticinin kütlesi}) \quad (3)$$

$$AP_{(toplam)} = \sum (AP_{(kirletici)} \times \text{Salınan kirleticinin kütlesi}) \quad (4)$$

$$\text{ÖP}_{(toplam)} = \sum (\text{ÖP}_{(kirletici)} \times \text{Salınan kirleticinin kütlesi}) \quad (5)$$

$$\text{OTİP}_{(toplam)} = \sum (\text{OTİP}_{(kirletici)} \times \text{Salınan kirleticinin kütlesi}) \quad (6)$$

$$\text{FOOP}_{(toplam)} = \sum (\text{FOOP}_{(kirletici)} \times \text{Salınan kirleticinin kütlesi}) \quad (7)$$

ECM Referans Dokümanında çevresel etkilerin yorumlanmasına yönelik "basit karşılaştırma" ve "Avrupa toplamalarına göre normalizasyon" olmak üzere iki yöntem sunulmaktadır. Pratik ve kolay bir yöntem olan basit karşılaştırma yöntemine göre her bir alternatif seçenek önem derecesine göre sıralanmakta ve böylece karşılaştırmanın genel görüntüsü verilmektedir. Ancak, basit karşılaştırma yöntemi çevresel etkilerin boyutu hakkında bilgi vermemektedir (EC, 2006). Çevresel etkilerin boyutu ise Avrupa toplamalarına göre normalizasyon yöntemi ile belirlenmektedir (EC, 2006). Yaşam döngüsü değerlendirmesindeki "katkı analizi" adımına benzeyen bu yöntemde alternatif seçeneklerin çevresel etkileri, ortak bir referans değere göre normalleştirilmektedir. Ortak referans değer ise alternatif seçeneğin belirli bir toplam Avrupa yüküne yapacağı katkı olarak ifade edilmektedir (EC, 2006).

2.2. Maliyetleme Metodolojisi (Costing Methodology)

Alternatif seçeneklerin maliyet analizi, ECM Referans Dokümanında sunulan maliyetleme metodolojisi esas alınarak hesaplanmıştır. Bu metodolojiye göre maliyet analizi kapsamında "reel fiyatların" kullanılması önerilmektedir (EC, 2006). Bu çalışmada, farklı yıllar için sunulan maliyet verileri, ilgili fiyat endeksleri kullanılarak 2021 reel fiyatlarına dönüştürülmüştür (Eşitlik 8 ve Eşitlik 9). Toplam yıllık maliyetler ise Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Fiyat ayarlayıcı} = \frac{\text{Analizin baz yılı için sunulan fiyat endeksi}}{\text{Taslak maliyet verisinin ait olduğu yıl için sunulan fiyat endeksi}} \quad (8)$$

$$\text{Dönüştürülmüş maliyet verileri} = \text{Orijinal maliyet verileri} \times \text{Fiyat ayarlayıcı} \quad (9)$$

$$\text{Toplam yıllık maliyet} = C_0 \left[\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right] + \text{OC} \quad (10)$$

Buradaki; C_0 malzemenin baz yıldaki maliyetini, r dönemlik faiz oranını, n malzemenin yıllar içindeki ömrünü ve OC ise toplam işletme ve bakım maliyetini ifade etmektedir.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, 2021 yılı için ortalama yıllık faiz oranı %20 (TÜİK, 2023) kabul edilmiştir. Ayrıca alternatif MET seçenekleri için ortalama birim maliyetler de (Eşitlik 11) hesaplanmıştır.

$$\text{Ortalama birim maliyet} = \frac{\text{Toplam yıllık maliyet}}{\text{Üretim miktarı}} \quad (11)$$

Alternatif MET seçeneklerinin karşılaştırılmasında, ihtiyaç duyulan yatırımın değerini hesaplamak için NBD yöntemi (Eşitlik 12) kullanılarak İVO da hesaplanmıştır (Cakir vd., 2020). Eşitlik 13'te görüldüğü gibi İVO, alternatif seçeneklerden elde edilen tüm nakit akışlarının, NBD değerinin sıfıra eşit olduğu faiz oranı olarak kabul edilmektedir (İbrahim vd., 2017).

$$\text{NBD} = -(\text{Yatırım harcamaları}) + \sum_{t=0}^n \left[\frac{(\text{Net gelir})_t}{(1+r)^t} \right] \quad (12)$$

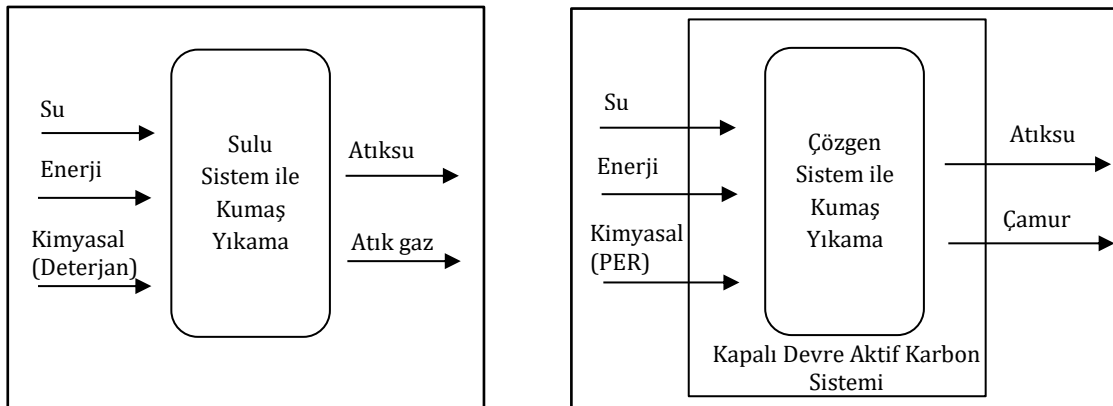
$$0 = \text{NBD} = -(\text{Yatırım harcamaları}) + \sum_{t=0}^n \left[\frac{(\text{Net gelir})_t}{(1+\text{İVO})^t} \right] \quad (13)$$

Burada sunulan t değeri, 0 yılından n yılına kadar olan süreyi ifade ederken; n ise proje süresini temsil etmektedir.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

3.1. Çapraz Medya Etkilerin Belirlenmesi (Identification of Cross-Media Effects)

Çapraz medya metodolojisi kapsamında ilk olarak çalışmanın sistem sınırları belirlenmiştir. Kumaş yıkama sistemi temel sistem sınırı olarak kabul edilmiştir. Belirlenen sistem sınırlarından faydalanılarak alternatif kumaş yıkama sistemleri için kaynak kullanımları ve emisyon oluşumları listelenmiştir. İki sistem için de aynı kumaş kalitesi ile aynı üretim hızı baz alınmıştır. Üretim kapasitesi ise saatte 0,8 ton olarak kabul edilmiştir. Tüketim verileri ve üretim kapasitesi dikkate alınarak kg ürün başına spesifik tüketimler ve oluşan emisyonlar hesaplanmıştır. Alternatif kumaş yıkama sistemlerinin (sulu ve çözgen sistemlerin) spesifik su tüketim miktarları sırasıyla $3,59 \times 10^{-6}$ ve $1,00 \times 10^{-2}$ m³/kg ürün olarak bulunmuştur.



Şekil 1. Kumaş Yıkama Proseslerinin Sistem Sınırları (System Boundaries of Fabric Washing Processes)

IPPC Tekstil BREF'inde, 0,5 m³/sa ortalama akış hızına sahip çözgen sistemin 75-125 g/sa'lık PER emisyonuna neden olduğu belirtilmektedir (EC, 2003). Ayrıca, kapalı devre aktif karbon sistemlerinin kullanılması ile atıksudaki PER konsantrasyonu 1 mg/L'nin (suya yükleme $\leq 0,5$ g PER/sa) altına düşürülebilmektedir (EC, 2003). Elde edilen verilerden faydalanılarak, atıksudaki PER konsantrasyonu $3,59 \times 10^{-9}$ kg/kg ürün bulunmuştur. Ayrıca, çözgen sistemde kullanılan kapalı-devre aktif karbon filtreleri ile egzoz çıkışı elimine edilmekte ve arıtılan hava da makinenin kumaş koku giderme/soğutma bölümüne gönderilmektedir (EC, 2003). Böylece, çözgen sistemden dış atmosfere herhangi bir hava akımı gönderilmemektedir (EC, 2003). Bu çalışmada, çözgen sistemin çevresel etkileri belirlenirken PER ve enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlar dikkate alınmıştır.

Sulu sistem ile kumaş yıkama proseslerinde çeşitli deterjan türleri kullanılmaktadır. Deterjan türleriyle beraber deterjan içerikleri de değişkenlik gösterdiği için malzeme güvenlik bilgi formlarından (material safety data sheet-MSDS) faydalanılarak deterjanların ortalama 900 mg O₂/g KOİ değerine neden olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada, sulu sistemin çevresel etkileri belirlenirken deterjan türleri için belirlenen ortalama KOİ değeri ve enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlar dikkate alınmıştır (EC, 2003).

Alternatif kumaş yıkama sistemlerinin enerji tüketim verileri Tablo 1’de sunulmuştur. IPPC Tekstil BREF’ine göre sulu sistemin elektrik tüketimi 252 kW/sa ve buhar tüketimi 3.890 kg/sa’dır (EC, 2003). Çözgen sistemde ise elektrik ve buhar tüketimleri sırasıyla 239 kW/sa ve 3.130 kg/sa’dır (EC, 2003). Alternatif kumaş yıkama sistemlerinin buhar ve enerji tüketim verilerinin hesaplanmasında kullanılan tüketim miktarları “organik çözgenler ile kumaş yıkanmasında (temizlenmesinde) tam kapalı-devre sistemlerin kullanımı” bölümünden elde edilmiştir (EC, 2003). Çarpım faktörleri ise ECM Referans Dokümanının “ANNEX 8-European Energy Mix” bölümünden kabul edilmiştir (EC, 2006). Enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlar ECM Referans Dokümanının Ek 10’unda sunulan “Avrupa elektrik ve ısı karması” dikkate alınarak hesaplanmıştır. Buna göre, 1 GJ elektrik tüketimi sonucu oluşan emisyonlar ve bu emisyonların çarpım faktörleri sırasıyla SO₂, CO₂ ve NO₂; 0,10, 117 ve 0,16’dır. 1 GJ buhar tüketimi sonucu oluşan emisyonlar ve bu emisyonların çarpım faktörleri ise sırasıyla SO₂, CO₂ ve NO₂; 0,54, 97,20 ve 0,18’dir. Alternatif kumaş yıkama sistemlerinde oluşan emisyonlar ise Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 1. Kumaş Yıkama Sistemlerinin Enerji Tüketim Verileri (Energy Consumption Data of Fabric Washing Systems)

Enerji Kaynağı	Birim	Sulu Sistem	Çözgen Sistem
Elektrik	GJ/kg ürün	1,13x10 ⁻³	1,08x10 ⁻³
Buhar	GJ/kg ürün	1,22x10 ⁻²	9,83x10 ⁻³

Tablo 2. Kumaş Yıkama Sistemlerinde Oluşan Emisyonlar (Emissions from Fabric Washing Systems)

Emisyonlar		Birim	Sulu Sistem	Çözgen Sistem
Suya salınan	Perkloroetilen (PER)	kg/kg ürün	-	3,59x10 ⁻⁹
	Deterjan	kg/kg ürün	2,00x10 ⁻²	-
	Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	kg/kg ürün	9,00	-
Enerji tüketiminden kaynaklanan	Kükürt dioksit (SO ₂)	kg/kg ürün	6,71x10 ⁻³	5,41x10 ⁻³
	Karbondioksit (CO ₂)	kg/kg ürün	1,32	1,08
	Azot dioksit (NO ₂)	kg/kg ürün	2,38x10 ⁻³	1,94x10 ⁻³

IPPC Tekstil BREF’ine göre alternatif kumaş yıkama sistemleri (sulu ve çözgen sistemlerin) çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahip olmaktadır (EC, 2003). Örneğin, kumaş yıkama proseslerindeki teknik ve kalitatif problemlerin çözümünde çözgen sistemlerin suya göre daha avantajlı olduğu belirtilirken; çözgen sistemlerdeki PER kullanımının da insanlar ve çevre üzerinde önemli problemlere neden olabileceği belirtilmektedir (EC, 2003). Bu nedenle, kumaş yıkamasında kullanılan sistemler ECM Referans Dokümanında sunulan metodolojiler esas alınarak karşılaştırılmıştır. Kumaş yıkama sistemlerinin toplam çevresel etkileri hesaplanmış ve Tablo 3’de sunulmuştur.

Tablo 3. Kumaş Yıkama Sistemlerinin Toplam Çevresel Etkileri (Total Environmental Impacts of Fabric Washing Systems)

Çevresel Temalar	Birim	Sulu Sistem	Çözgen Sistem
BTP	kg Pb/ kg ürün	5,56x10 ⁻⁴	4,49x10 ⁻⁴
ATP	m ³ / kg ürün	9,00x10 ³	1,09x10 ⁻⁵
KIP	kg CO ₂ / kg ürün	1,32	1,08
ÖP	kg PO ₄ / kg ürün	1,98x10 ⁻¹	-
AP	kg SO ₂ / kg ürün	7,90x10 ⁻³	6,39x10 ⁻³
FOOP	kg C ₂ H ₄ /kg ürün	1,27x10 ⁻³	1,04x10 ⁻³

Çapraz medya analizi kapsamında, muhtemel çevresel etkileri olan bazı emisyonlar, emisyon faktörlerinin mevcut olmaması nedeniyle, ilgili çevresel temalardaki hesaplamalara dahil edilmemiştir. Örneğin, enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlardan SO₂ ve NO₂’nin KIP faktörü; PER’in ÖP faktörü, CO₂’nin ise AP ve FOOP faktörleri mevcut değildir. Bu nedenle, bu emisyonlar ilgili çevresel temalardaki hesaplamalara dahil edilmemiştir. Ayrıca, CFC-11 eşdeğeri olarak ifade edilen OTİP, kumaş yıkama sistemleri tarafından üretilmeyen kloroflorokarbonlar (CFC’ler) ile ilişkili olduğu için sulu ve çözgen sistemlerin OTİP değerleri hesaplanmamıştır. Alternatif kumaş yıkama sistemleri ECM Referans Dokümanında sunulan metodoloji esas alınarak beş farklı çevresel temada değerlendirilmiştir. Sulu sistem değerlendirilen beş çevresel temada da çözgen sisteme göre daha yüksek çevresel etkiye neden olmuştur. Bu durum sulu sistemin daha yüksek enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, çözgen sistemin ATP değerindeki daha düşük çevresel etkisi ise aktif karbon adsorpsiyonu ile atıksudaki PER gideriminden kaynaklanmaktadır.

3.1.1 Çapraz Medya Etkilerin Yorumlanması (Interpretation of Cross-Media Effects)

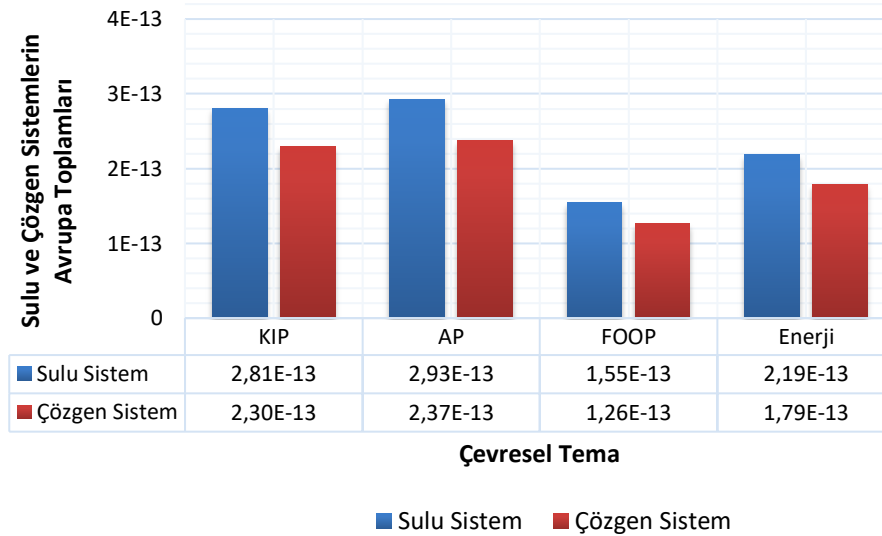
Belirlenen çevresel etkiler, ECM Referans Dokümanında sunulan, iki farklı yöntem (basit karşılaştırma ve Avrupa toplamlarına göre normalizasyon) ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2’de sunulan basit karşılaştırma yöntemine göre, çözgen sistemin değerlendirilen her bir çevresel temada (BTP, KIP, ATP, AP, ÖP ve FOOP) daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Ancak basit karşılaştırma yöntemi ile alternatif seçeneklerin sadece genel görüntüsü sunulmuştur. Çevresel etkilerin boyutu hakkında karşılaştırma yapılabilmesi için Avrupa toplamlarına göre normalizasyon yöntemi kullanılmıştır.

Çevresel Temalar	Sulu Sistem	Çözgen Sistem
BTP	2	1
ATP	2	1
KIP	2	1
ÖP	2	1
AP	2	1
OTİP	Değerlendirilmedi	Değerlendirilmedi
FOOP	2	1

1: İyi performans
2: Düşük performans

Şekil 2. Kumaş Yıkama Sistemlerinin Basit Karşılaştırılması (Simple Comparison of Fabric Washing Systems)

Alternatif seçeneklerin çevresel etkileri (KIP, AP, FOOP ve enerji tüketimi) için hesaplanan Avrupa toplamları Şekil 3’te gösterilmiştir. BTP ve ATP parametreleri, normalleştirme faktörleri olmadığı için bu değerlendirmenin dışında tutulmuştur. AP değeri, her iki kumaş yıkama sisteminde de en yüksek çevresel etkiye neden olurken bunu sırasıyla KIP, enerji tüketimi ve FOOP değerleri takip etmiştir. Sulu sistem çözgen sistemden KIP, AP ve FOOP parametrelerinde sırasıyla 1,22, 1,23 ve 1,23 kat daha yüksek çevresel etkiye neden olmuştur. Bu durum, sulu sistemin daha yüksek enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. Kumaş Yıkama Sistemlerinin Avrupa Toplamlarına Göre Normalizasyonu (Normalization of Fabric Washing Systems According to European Totals)

3.2 Maliyetlerin Hesaplanması (Calculation of Costs)

ECM Referans Dokümanında sunulan maliyetleme metodolojisinden faydalanılarak alternatif kumaş yıkama sistemlerinin maliyet analizi hesaplanmıştır. Sulu sistemde işçilik, elektrik, buhar, su, atıksu ve deterjan maliyetleri sırasıyla 32 Euro, 25,2 Euro, 116,7 Euro, 2,4 Euro, 6,24 Euro ve 24,8 Euro’dur (EC, 2003). Çözgen sistemde ise işçilik, elektrik, buhar, su, PER ve çamur maliyetleri sırasıyla 32 Euro, 23,9 Euro, 93,9 Euro, 6,9 Euro, 3,2 Euro ve 12,48 Euro’dur (EC, 2003). Sulu ve çözgen sistemlerin maliyet verileri IPPC Tekstil BREF’inde yer alan “organik çözgenler ile kumaş yıkanmasında (temizlenmesinde) tam kapalı-devre sistemlerin kullanımı” başlıklı bölümden elde edilmiştir (EC, 2003). Bu kapsamda; alternatif kumaş yıkama sistemlerinin baz yıldaki (2021) nominal ve reel fiyatları belirlenerek toplam yıllık maliyetleri hesaplanmıştır. Ayrıca, solvent sistemin NBD ve İVO değerleri hesaplanmıştır.

Alternatif kumaş yıkama sistemlerinin maliyet analizi kapsamında ilk olarak baz yıldaki (2021) fiyatlar hesaplanmıştır. Nominal fiyatların hesaplanmasında kullanılan fiyat dengeleyici oranı 1,37 (1997 ve 2021 yılları için sırasıyla 76,48 ve 104,70) olarak kabul edilmiştir (OECD, 2023). Reel fiyatların hesaplanmasında kullanılan gayri safi yurtiçi hasıla (Gross domestic product-GDP) oranı ise 1,08 (1997 ve 2021 yılları için GDP deflatörü sırasıyla 93,49 ve 101,24) olarak kabul edilmiştir (OECD, 2023). Baz yıldaki fiyatlara göre, sulu ve çözgen sistemin reel fiyatları sırasıyla 0,34 ve 0,29 USD/kg ürün olarak hesaplanmıştır (Tablo 4). Alternatif kumaş yıkama sistemlerinin reel fiyatları dikkate alındığında çözgen sistemin %17 daha tasarruflu olduğu görülmektedir (Balkan, 2022). Bu durum ekonomik açıdan çözgen sistemin tercih edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 4. Kumaş Yıkama Sistemlerinin Nominal ve Reel Fiyatları (Nominal and Real Prices of Fabric Washing Systems)

Maliyet Bileşenleri	Sulu Sistem (USD/kg ürün)		Çözgen Sistem (USD/kg ürün)	
	Nominal Fiyat (2021)	Reel Fiyat (2021)	Nominal Fiyat (2021)	Reel Fiyat (2021)
İşçilik	0,06	0,05	0,06	0,05
Elektrik	0,05	0,04	0,04	0,04
Buhar	0,21	0,19	0,17	0,16
Su	0,004	0,004	0,01	0,01
Atıksu	0,01	0,01	-	-
Deterjan	0,04	0,04	-	-
PER	-	-	0,01	0,01
Çamur	-	-	0,02	0,02
Toplam	0,37	0,34	0,31	0,29

IPPC Tekstil BREF'ine göre, 3.000 ton ve üzeri üretim yapan tesislerde çözgen sistem ile kumaş yıkama prosesinin geri ödeme süresinin 2-3 yıl olduğu belirtilmektedir (EC, 2003). Sulu sisteme göre elde edilen yıllık kazanç 0,34 USD/kg ürün; toplam yıllık yatırım maliyeti ise 0,68 USD/kg ürün olarak bulunmuştur. Çözgen sistemin NBD hesaplamasında indirgeme oranı %20 kabul edilmiş ve 25 yıllık NBD değerinin 10.531 USD olduğu hesaplanmıştır. Yatırımın İVO değeri ise %26 olarak bulunmuştur. İVO değerinin, faiz oranından büyük olması yatırım için olumlu kabul edilmektedir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

ECM Referans Dokümanında sunulan çapraz medya metodolojisine göre, sulu sistemin çözgen sistemden BTP, KIP, AP ve FOOP değerlerinde sırasıyla 1,24, 1,22, 1,24, 1,23 kat daha fazla çevresel etkiye neden olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, ATP değerine göre çözgen sistem %100 daha düşük çevresel etki sergilemiştir. Bu durum, hem kapalı devre filtrelerin kullanımı ile dış atmosfere herhangi bir hava akımının gönderilmemesinden hem de aktif karbon adsorpsiyonu ile atıksudaki PER'in geri kazanımından kaynaklanmaktadır. Çapraz medya metodolojisinden elde edilen sonuçlara göre, daha düşük çevresel etki ile sonuçlanan çözgen sistemin, sulu sisteme kıyasla tercih edilebileceği görülmüştür.

Maliyetleme metodolojisi kapsamında ise sulu ve çözgen sistemin reel işletme maliyetleri sırasıyla 0,34 ve 0,29 USD/kg ürün bulunmuştur. Ayrıca, çözgen sistemin 25 yıllık kullanım ömrü dikkate alınarak toplam NBD ve İVO değerleri ise sırasıyla 10.531 USD ve %26 olarak hesaplanmıştır. İVO değerinin, faiz oranından büyük olması yatırımın olumlu olduğunu göstermektedir. Maliyetleme metodolojisinden elde edilen sonuçlar ise %17 daha tasarruflu olan çözgen sistemin ekonomik açıdan da tercih edilebileceğini göstermiştir.

Bu çalışmada hem çevresel hem de ekonomik yönleri bulunan alternatif tekniklere karar verme sürecinde yaşanan zorluklar vurgulanmaktadır. ECM Referans Dokümanı temelde yaşanan bu zorlukları kolaylaştırmayı amaçlamaktadır. Ancak, çevresel temalar hesaplanırken kullanılan bazı emisyonların çarpım faktörlerinin olmaması yürütülen çalışmayı zorlaştırmaktadır. Bu doğrultuda, çarpım faktörlerinin eklenerek ECM Referans Dokümanının zenginleştirilmesi ve farklı sektörlerde gerçek tesis verileri ile yapılan çalışmaların/uygulama örneklerinin artırılması önerilmiştir. Böylece veri setleri oluşturulabilir ve ilerleyen süreçte oluşturulan veri setleri derlenerek ECM Referans Dokümanının daha kullanıcı dostu olması sağlanabilir. ECM Referans Dokümanının geliştirilmesi ve zenginleştirilmesi bu konuda çalışan araştırmacılar ve paydaşlar için önemli katkılar sunabilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Balkan, M., 2022. Tekstil Endüstrisinde Mevcut En İyi Teknikler için Ekonomik ve Çevresel Çapraz Medya Etki Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 73s, Isparta.
- Cakir, N., Alp, E., Yetis, U., 2020. Assessing Technologies for Reducing Dust Emissions from Sintermaking Based on Cross-Media Effects and Economic Analysis. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22:1909-1928. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01933-9>.
- Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB), 2023. Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü. Erişim Tarihi: 08.07.2023. <https://ippc.csb.gov.tr>
- Cikankowitz, A., Laforest, V., 2013. Using BAT Performance as an Evaluation Method of Techniques. *Journal of Cleaner Production*, 42, 141-158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.005>
- Danish Environmental Protection Agency (DEPA), 2022. Photochemical Ozone Formation Erişim Tarihi: 08.07.2023. https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-574-3/html/kap06_eng.htm#6.3.
- Demirel, Y.E., 2019. Entegre Bir Tekstil İşletmesinde Temiz Üretim Uygulamaları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 226s, Isparta.
- Doğan, B., 2008. Assessment of the Best Available Wastewater Management Techniques for a Textile Mill: Cost and Benefit Analysis. Middle East Technical University, Science Institute, Department of Environmental Engineering, M.Sc. Thesis, 202p, Ankara.
- European Commission (EC), 2003. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques for the Textile Industry. EC IPPC Bureau, Seville, Spain.
- European Commission (EC), 2006. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Economics and Cross-Media Effects. EC IPPC Bureau. Seville, Spain.
- Evrard, D., Laforest, V., Villot, J., Gaucher, R., 2016. Best Available Technique Assessment Methods: a Literature Review from Sector to Installation Level. *Journal of Cleaner Production*, 121, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.096>
- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- Ibáñez-Forés V, Bovea MD, Azapagic A, 2013. Assessing the sustainability of Best Available Techniques (BAT): methodology and application in the ceramic tiles industry. *J Clean Prod* 51:162–176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.020>
- Ibrahim, A.Y., Ghallab, A.O., Gadalla, M.A., Makary, S.S., Ashour, F.H., 2017. Technical and Economical/Financial Feasibility Analyses of Flared Gas Recovery in Egypt from Oil and Gas Industry from International/National Oil Companies' Perspectives *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19:1423-1436. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1340-2>.
- Jungbluth, N., 2020. Description of Life Cycle Impact Assessment Methods. ESU-services Ltd., Switzerland, 40p. <http://esu-services.ch/address/tender/>.
- Kim, T. H., Chae, C. U., 2016. Environmental Impact Analysis of Acidification and Eutrophication Due to Emissions from the Production of Concrete. *Sustainability (Switzerland)*, 8(6), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su8060578>
- Lameh, M., Al-Mohannadi, D.M., Linke, P., 2022. Minimum Marginal Abatement Cost Curves (Mini-MAC) for CO2 Emissions Reduction Planning. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24:143-159. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02095-y>.
- McKone, T.E., Hertwich, E.G., 2001. The Human Toxicity Potential and a Strategy for Evaluating Model Performance in Life Cycle Impact Assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(2):106-109. <https://doi.org/10.1007/BF02977846>.
- Morelli, B., Hawkins, T. R., Niblick, B., Henderson, A. D., Golden, H. E., Compton, J. E., Cooter, E. J., Bare, J. C., 2018. Critical Review of Eutrophication Models for Life Cycle Assessment. *Environmental Science and Technology*, 52(17), 9562–9578. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00967>
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2023. Inflation (CPI) (indicator). Erişim Tarihi: 08.07.2023. <https://data.oecd.org>
- Ozturk E, Koseoglu H, Karaboyacı M, Yigit NO, Yetis U, Kitis M., 2016. Minimization of water and chemical use in a cotton/polyester fabric dyeing textile mill. *J Clean Prod* 130:92–102. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.080>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2023. Tüketici Fiyat İndeksi. Erişim Tarihi: 20.07.2023. <https://data.tuik.gov.tr/>.