


POLİESTER KUMAŞIN EKOLOJİK BOYAMA İŞLEMİ OPTİMİZASYONU İÇİN YANIT YÜZEY METODOLOJİSİ YAKLAŞIMI

Tuba TOPRAK-ÇAVDUR ^{1*} 

Tolga ÇELİK ¹ 

Fatih ÇAVDUR ^{2*} 

Alınma:15.02.2024; düzeltme:15.03.2024; kabul:27.03.2024

Öz: Poliester liflerinin hidrofobik yapısı, yüksek kristalinitesi, lifleri oluşturan makromoleküller arasındaki yüksek çekim kuvveti gibi özellikleri boyanmasında önemli kısıtlar oluşturur. Ayrıca, poliesterin boyanmasında kullanılan yöntem ve kimyasallar çevre için zararlıdır. Bu çalışmada, bu sınırlamaları ortadan kaldırmak ve daha çevre dostu boyama prosesi geliştirmek amacıyla, poliesterin doğal boya ile boyanabilirliği ve yanıt yüzey metodoloji ile işlem parametrelerinin optimizasyonu araştırılmıştır. Bu kapsamda öncelikle pH, sıcaklık ve süreden oluşan üç faktör için Box-Behnken deneysel tasarımından baz alınan üç seviye belirlenerek bunlara yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deney sonuçlarına bağlı olarak L^* , a^* , b^* , C^* gibi farklı çıktılar tahmin etmek için kullanılabilecek bir meta model oluşturmak amacıyla yapılan incelemelerde, literatürde de genel olarak kullanılmakta olan ikinci dereceden bir modelin ilgili sonuçlarını tahmin etmede başarılı olduğu ($R^2 \geq 0,9$) ve bazı tasarımlarda ilgili R^2 değerlerinin 0,99 seviyelerine yaklaşmakta olduğu gözlenmiştir. Benzer şekilde bazı çıktılar için 0,1720 ortalama mutlak hatayla deney sonuçlarını tahmin edebildiği görülmektedir. Buna ek olarak, oluşturulan model denklemlerinden teorik optimal boyama koşulları tespit edilmiştir. Sonuçlar poliesterin boyanmasında pH-sıcaklık ve pH-süre ikililerinin, sıcaklık ve süreye göre çok daha etkili olduğunu ve ayrıca alınan yüksek yıkama hasılları bu boyama prosesinin açık-orta tonlarda sürdürülebilir boyamalar için kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca bu çalışmanın maliyet ve zaman tasarrufu sağlama potansiyeli de vardır.

Anahtar Kelimeler: Yapay zeka, deneysel tasarım, yanıt yüzey metodolojisi (YYM), meta-model, optimizasyon, curcumin

Response Surface Methodology Approach for Ecological Dyeing Process Optimization of Polyester Fabric

Abstract: Properties of polyester fibers such as their hydrophobic structure, high crystallinity, and high attraction force between the macromolecules that make up the fibers create important restrictions on dyeing. In addition, the methods and chemicals used in dyeing polyester are harmful to the environment. In this study, in order to eliminate these limitations and develop a more environmentally friendly dyeing process, the dyeability of polyester with natural dye and the optimization of process parameters with response surface methodology were investigated. In this context, first of all, three levels based on the Box-Behnken experimental design were determined for the three factors of pH, temperature and time, and experimental studies were carried out on them.

^{1*} Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, 16059 Bursa/Türkiye

^{2*} Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 16059 Bursa/Türkiye

İletişim Yazarı: Tuba Toprak-Çavdur (tubatoprak@uludag.edu.tr)

İletişim Yazarı: Fatih Çavdur (fatihcavdur@uludag.edu.tr)

In the examinations carried out to create a meta model that could be used to predict different outcomes such as L^* , a^* , b^* , C^* depending on the experimental results, it was concluded that a second-order (quadratic) model generally used in the literature was successful in predicting the corresponding results ($R^2 \geq 0.9$) and it was observed that corresponding R^2 approaches 0.99 in some of the designs. Similarly, it was noted that we could predict the results of the experiments with a mean absolute error of 0.1720. In addition, theoretical optimal dyeing conditions were determined from the created model equations. The results showed that the pH-temperature and pH-time pairs were much more effective than the temperature and time in dyeing polyester, and also the high washing fastnesses obtained showed that this dyeing process could be used for sustainable dyeing in light-medium shades. Moreover, this study has the potential to save costs and time, too.

Keywords: Artificial intelligence, experimental design, response surface methodology, meta-model, optimization, curcumin

1. GİRİŞ

Kökünü 100.000 yıl öncesine dayanan tekstil, günümüzde dünyanın en yüksek miktarda seri üretim yapan sektörlerinden biri haline gelmiştir (Antczak ve diğ., 2019; Ranasinghe ve Jayasooriya, 2021). Dünyanın en önemli endüstrilerinden biri olan tekstil yüksek miktarlarda su, kimyasal madde ve enerji gibi kaynakların tüketiminin yanı sıra çevre için çok büyük tehditler oluşturan yüksek miktarda atık üretimiyle de karakterize edilmektedir (Karthik ve Gopalakrishnan, 2014; Khan ve Islam, 2015; Toprak ve Anis, 2017; Yacout ve Hassouna, 2016). Bu nedenle tekstil endüstrisinde çevre dostu ürünlere olan ilgi çevre kirliliği ve küresel ısınmaya ilişkin artan endişelere paralel olarak her geçen gün artmaktadır (de Oliveira Neto ve diğ., 2019; Guha, 2018; Lee, 2017).

Günümüzde en önemli ve yaygın olarak kullanılan polikondenzasyon polimerlerinden biri olan poliester, sadece tekstil ürünü olarak değil aynı zamanda şişe/kap, fotoğraf filmi vb. gibi çeşitli alanlarda temel malzeme olarak da yaygın olarak kullanılmaktadır. Poliester tekstilde en çok kullanılan sentetik liftir ve lif pazarının yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır (DeGuzman, 2020). Son yirmi yılda poliester elyaf üretimi küresel çapta yılda yaklaşık %7,2 oranında artış göstermiştir. Poliester lifinin 2004 yılındaki büyüme oranı %9,7 ve üretimi 24,5 milyon ton iken (Aizenshtein, 2006), 2020 yılında poliester lif üretimi 57,1 milyon tona ulaşmıştır (Fernández, 2021).

Hidrofobik ve non-iyonik yapıdaki poliesterin boyanmasında kullanılan en önemli boya sınıfı dispers boyadır. İyi derecede haslık ve geniş renk gamı sağlayan bu boya, yüksek sıcaklık (HT), keriyer veya termosol boyama yöntemleriyle uygulanabilir. Kompakt yapılı poliesterin boyanmasında kullanılan bu yöntemler yoğun enerji ve su tüketimine ve keriyer gibi çevreye zararlı kimyasalların tüketimine neden olmaktadır. Ayrıca boyamada sadece dispers boyaların kullanılabilmesi boyama prosesinde çeşitli kısıtlamaları da beraberinde getirmektedir (Chakraborty, 2010, 2014a; Koh, 2011). Bu dezavantaj ve kısıtlamalara, çevre ve sağlık konularıyla ilgili küresel mevzuat baskıları da eklenince son yıllarda poliesterin çeşitli doğal kaynaklardan elde edilen doğal renklendiricilerle boyanmasına odaklanan çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Liman ve diğ., 2020; Rahman Bhuiyan ve diğ., 2018; Sen ve diğ., 2018; Shahin ve diğ., 2014; Vadood ve Haji, 2022). Zerdeçalda (*Curcuma longa*) bulunan doğal renklendirici curcumin, dispers boyalara olası bir alternatif olarak poliester elyafı boyamak için çevre dostu bir renklendirici olarak kullanılmıştır (Elnagar ve diğ., 2014; Hasan ve diğ., 2014; Kerkeni ve diğ., 2012). Genel olarak curcumin düşük toksisitesi, biyoyumluluğu, biyolojik olarak parçalanabilirliği nedeniyle yeşil ve sürdürülebilir bir renklendirici olarak kabul edilir. Curcumin bunların yanı sıra antimikrobiyal, antioksidan, antifungal ve UV koruma gibi çeşitli fonksiyonel özelliklere de sahiptir (Abate ve diğ., 2020). Bununla birlikte, curcuminin geleneksel çektirme veya emdirme boyama yöntemleri kullanılarak poliesterde uygulanması, kumaş ön ve/veya son

işlemlerini (Elnagar ve diğ., 2014; Kerkeni ve diğ., 2012; Zhou ve diğ., 2019) ve mordan kullanımını gerektirir (Purwar, 2016; Samanta ve Agarwal, 2009).

Tüm sektörlerde olduğu gibi tekstilde de sürdürülebilirliğin büyük önem kazanması ve bazı azo ve benzidin boyalarının yasaklanması, boyama prosesinde doğal boyaların kullanımına olan ilginin artmasını sağlamıştır (Yusuf ve diğ., 2017). Bitkisel, mineral ve hayvansal kaynaklardan elde edilebilen doğal boyalar (Vankar ve Shukla, 2019) uygulandığı malzemeye UV koruma (İbrahim ve diğ., 2013), antimikrobiyal (Datta ve diğ., 2013; Gupta ve diğ., 2004), güç tutuşurluk (Basak ve diğ., 2016) gibi fonksiyonel özellikler de katmaktadır. Bunların yanı sıra bu boyaların non-toksik, biyobozunur, biyoyumlu (Saxena ve Raja, 2014; Shahid-Ul-Islam ve diğ., 2013) olması gibi ekolojik avantajları sürdürülebilir tekstil üretimine katkı sağlamaktadır. Doğal boyaların bu benzersiz avantajlarının yanı sıra, tekstil liflerine karşı düşük afiniteleri (Haji ve Naebe, 2020), düşük renk kuvvetleri (Pizzicato ve diğ., 2023), zayıf renk haslıkları (Shahid ve diğ., 2013) ve sınırlı renk gamı (Affat, 2021) önemli dezavantajlarıdır. Metalik tuz mordanları, boya moleküllerinin fonksiyonel grupları ile tekstil substratı arasında koordinat bağları oluşturarak bu eksiklikleri ortadan kaldırırsa da (Jabar ve diğ., 2020; Khan ve diğ., 2012), bu mordanların çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri vardır (Hosen ve diğ., 2021). Dolayısıyla bu dezavantajlar literatür için geliştirilmesi ve incelenmesi gereken önemli bir alanı oluşturmaktadır (Chao ve diğ., 2017; Ghaheh ve diğ., 2021; Hosen ve diğ., 2021; Rani ve diğ., 2020). Ayrıca doğal boyaların eldesinde kullanılan kaynakların mevcudiyetinin mevsimsel olması, karmaşık fiziksel ve kimyasal yapıları nedeniyle doğa koşullarının değişiminden etkilenmeleri ve ekstraksiyon proseslerinin karmaşıklığından dolayı tekrarlanabilirliklerinin düşük olması büyük bir endişe kaynağıdır (Sk ve diğ., 2021). Bu boyaların ışığa ve sıcaklığa karşı stabil olmamaları da depolanmaları sırasında dikkat ve özen gerektirir (Armalina ve diğ., 2020; Shin ve Yoo, 2012).

Çoğu durumda, bazı kontrol edilebilir değişkenleri (faktörleri) bir yanıtla ilişkilendiren teorik model ya mevcut değildir ya da çok karmaşıktır. Bu durumda faktörler ile tepki arasındaki ilişkiye dair bilgilerin ampirik yoldan elde edilmesi gerekmektedir. Box ve Wilson tarafından 1951 yılında tanımlanan Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM)'nin amacı problemleri ortaya çıktığı şekliyle ampirik bir modelle analiz etmek olan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir koleksiyonudur. YYM amaçlarından bazıları şunlardır: i) ilgi duyulan deneysel alanda bilgi üretmek, ii) deneysel değişkenliği güvenilir bir şekilde tahmin etmek, iii) önerilen model ile deneysel veriler arasındaki yeterliliği garanti etmek (uyumsuzluğun tespitini kolaylaştırmak), iv) deneysel alanda hiçbir deneyin yapılmadığı noktalarda gözlemlenen tepkiyi mümkün olduğu kadar kesin bir şekilde tahmin etmek, v) elde edilen sonuçlara göre farklı alternatiflerle deneylerin gerçekleştirilmesine yönelik sıralı stratejiler önermek, vi) belirsizlik koşullarında karar vermeyi mümkün kılmak, belirsizliği azaltmaktır. Özetle YYM, model uydurma ve bunların analizinden çok daha fazlasını içermektedir. YYM, endüstriyel deneylerin çekirdeği haline gelmiştir (Hadiyat ve diğ., 2022; Sarabia ve Ortiz, 2009). Bu teknik, tekstil atık sularının arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Husien ve diğ., 2022; Liu ve diğ., 2024; Manesa ve Dyosi, 2023; Nnaji ve diğ., 2022).

Çevreyi en çok kirleten sektörlerden biri olan tekstilde hassasiyetle üzerinde durulan en kritik konulardan biri olan çevre dostu üretim kapsamında bu çalışmada poliesterin doğal boya ile farklı boyama şartları altında boyanma davranışı incelenmiştir. *Curcuma longa* (zerdeçal) doğal boyasının diğer doğal boyalarda olduğu gibi geleneksel yöntemler kullanılarak sentetik elyaflara uygulanması genellikle bir ön işlem (yüzey ön aktivasyonu) ve farklı türde mordan kullanımını gerektirir. Bu ilave işlemler, prosesin maliyetini artırmakta ve doğal boyaların kullanımını çevre açısından engellemektedir. Bu bağlamda, doğal boyaların sentetik elyaflara ek ön işlem ve yardımcı kimyasallar olmadan uygulanmasına duyulan ihtiyaç bu çalışma ile giderilerek literatürdeki önemli bir boşluk doldurulmuştur. Ayrıca, poliesterin doğal boya ile boyanmasında proses değişkenlerinin etkilerini değerlendirmek ve en uygun boyama koşullarını analiz etmek için Box-Behnken benzeri bir deney tasarımı ile Yanıt Yüzey Metodolojisi kullanılmıştır.

Boyama prosesindeki faktörler işlem süresi, sıcaklık ve pH olarak belirlenmiştir. Doğal boyamadan sonra kumaşların performansları yıkamaya karşı renk haslığı değerleri özellikleri açısından test edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

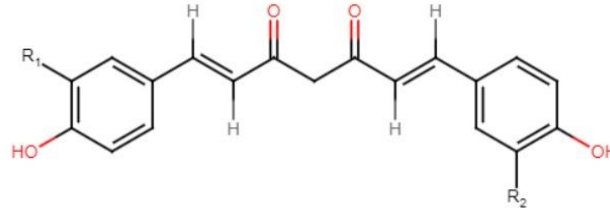
2.1. Materyal

Bu çalışmada %100 poli (etilen tereftalat) (PET) dokuma kumaşlar kullanılmıştır. Dokuma kumaşın özellikleri Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Kumaş özellikleri

| | |
|---------------------|-----------------------|
| Ağırlık | 80 g/m ² |
| Sıklık (çözgü-atkı) | 70 tel/cm - 42 tel/cm |
| İplik numarası | 70 denye (tursuz) |
| Örgü | Bezayağı |

Ham poliester kumaşların boyamadan önceki ve sonraki yıkama işlemlerinde Rucogen®FWD (Rudolf Duraner) kullanılmıştır. Banyoların pH değerlerini ayarlamak için kullanılan asetik asit (CH₃COOH) (%100) analitik kalitededir ve Merck’ ten temin edilmiştir. Doğal boya olarak *Curcuma longa* (zerdeçal) (C.I. Natural Yellow 3) (Chakraborty, 2014b) kullanılmıştır ve kimyasal yapısı Şekil 1’de verilmiştir.



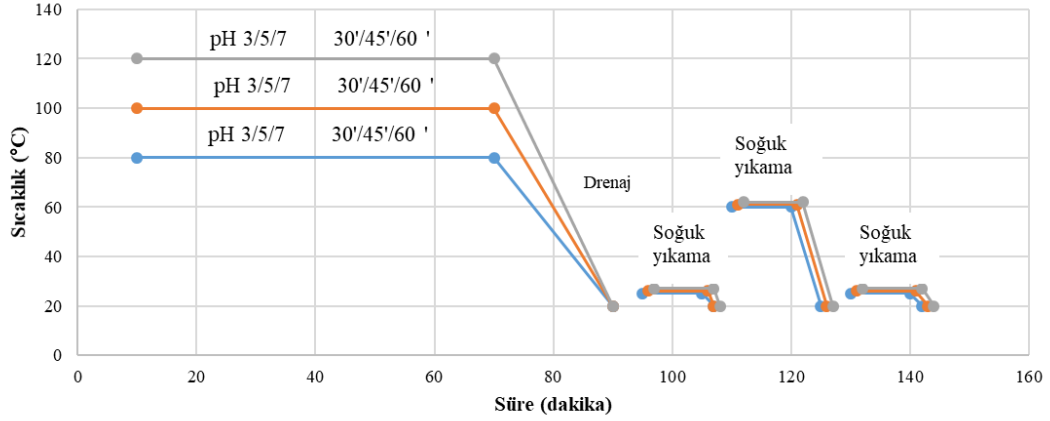
Şekil 1:

Curcuma longa (zerdeçal) kimyasal yapısı

2.2. Yöntem

Boyamadan önce PET kumaş 1 g/l sodyum karbonat ve 1 g/l yıkama maddesi içeren banyoda 50 °C’de 30 dakika yıkanmıştır. Yıkama ve kurutma işlemine tabi tutulmuş %100 PET kumaşların boyanmasında doğal boya % 2 (k.a.g.) konsantrasyonda kullanılmıştır. Poliester kumaşlar Dyetech Polybath Numune Boyama Makinasında 1:50 flotte oranında boyanmıştır. Boyamalar farklı pH - sıcaklık - süre kombinasyonlarında gerçekleştirilmiştir. Bu kombinasyonlarda her bir faktör için kullanılan değerler şöyledir: pH 3-5-7, sıcaklık 80-100-120 °C, süre 30-45-60 dakikadadır.

Doğal boyamalardan sonra üç adımdan oluşan bir yıkama prosedürü izlenmiştir. Yıkama işlemleri soğuk durulama (20°C /30 °C - 10 dakika), sıcak yıkama (60 °C - 10 dakika) ve soğuk durulama (20°C /30 °C - 10 dakika) adımlarından oluşturulmuştur. Sıcak yıkama 1 g/l yıkama maddesi varlığında 1:50 flotte oranında yapılmıştır. Yaş proseslerin sıcaklık-süre diyagramları Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2:
Yaş proseslerin sıcaklık-süre diyagramları

Numunelerin renk koordinatları (L^* , a^* , b^* , C^* ve h°) Konica Minolta CM-3600D spektrofotometre ($D65 / 10^\circ$) kullanılarak SCI modunda ölçülmüştür. Numunelerin renk kuvvetleri de aynı spektrofotometre cihazından alınan reflektans değerleri kullanılarak Kubelka-Munk (Akgun ve diğ., 2014) eşitliğine (Eşitlik 1) göre hesaplanmıştır. Olası deneysel hataları azaltmak için her bir numuneden 90° döndürülerek dört ölçüm alınmıştır.

$$K/S = (1 - R)^2/2R \quad (1)$$

Bu eşitlikte R reflektans, K ışık absorpsiyon katsayısı, S ise ışık saçılma katsayısıdır.

Boyanan kumaşların yıkama haslıığı, evsel ve ticari yıkamaya karşı renk haslıığı standardı (EN ISO 105-C06/A1M) kullanılarak TEST T412NYK yıkama haslıığı makinesinde gerçekleştirilmiştir.

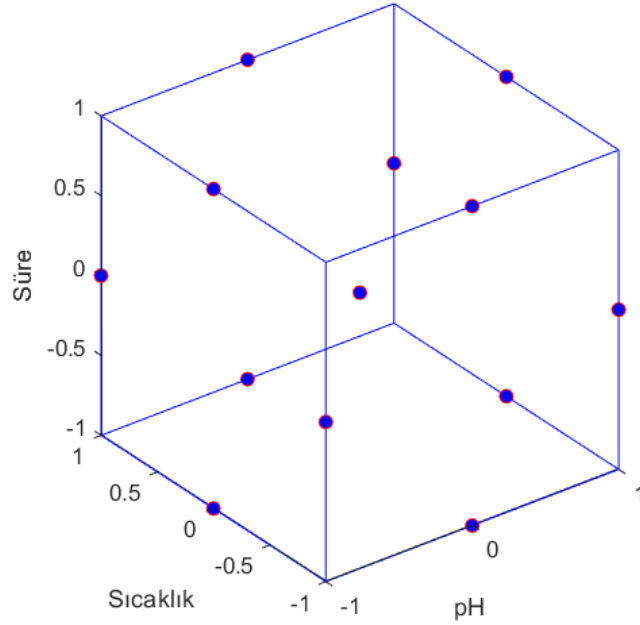
2.3. Deneysel Tasarım

Deney tasarımı, çok değişkenli sistemleri etkili bir şekilde optimize etmek için kullanılan araçlardan biridir. Ayrıca deney tasarımı, bir çalışmadan elde edilen bilgi miktarını en üst düzeye çıkarırken toplanan veri miktarını en aza indirmek için kullanılan en etkili yöntemlerdendir. Deney tasarımından elde edilen Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM), sonuçlar üzerinde bireysel etkileri, etkileşim etkilerini ve ikinci dereceden etkileri bulmayı destekleyen istatistiksel tekniktir (Boominathan ve diğ., 2022). Poliesterin doğal boyama optimizasyon çalışmasında Box-Behnken deney tasarımına benzer bir tasarımla YYM kullanılmıştır. Bu optimizasyon çalışması MatLab programı kullanılarak yapılmış, deneysel veriler arasındaki matematiksel ilişkiler aşağıdaki kuadratik model eşitliği (Eşitlik 2) aracılığıyla incelenmiştir:

$$z = f(x, y) = \beta_{00} + \beta_{10}x + \beta_{01}y + \beta_{11}xy + \beta_{20}x^2 + \beta_{02}y^2 \quad (2)$$

Bu eşitlikte, $f(x, y)$ ilgili deney sonucunda elde edilen çıktıyı (L^* , a^* , b^* , C^* h ve K/S çıktılarından birisini), x ve y değişkenleri de gerçekleştirilen deneylerdeki girdilerden (pH, sıcaklık ve süre) modelde dikkate alınmakta olan ikiliyi göstermektedir.

Gerçekleştirilen ön analizler sonucunda süreç faktörleri ve seviyeleri belirlenmiştir. Bu ön deneyler sonunda boyaaöncema işlemi sırasında Şekil 3' tekinde benzer şekilde üç faktörlü bir Box-Behnken tasarımı dikkate alınarak her bir faktör için üç seviye seçilmiş ve bunlara ait değerler Tablo 2'de verilmiştir. Önerilen deney tasarımına göre, seçilen üç proses parametresinin ve bunların kolorimetre üzerindeki etkilerini analiz etmek için her bir parametre kombinasyonundan üç tekrar olmak üzere 45 deney gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3:
pH, sıcaklık ve süre için üç faktörlü Box-Behnken tasarımı örneği

Tablo 2. pH, sıcaklık ve süre faktörleri için seviyeler

| Faktör | Deney tasarım seviyeleri | | |
|----------|--------------------------|----------|-------------|
| | Düşük (-1) | Orta (0) | Yüksek (+1) |
| Sıcaklık | 80°C | 100°C | 120°C |
| Süre | 30 | 45 | 60 |
| pH | 3 | 5 | 7 |

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kolorimetre

Doğal boyamalardan elde edilen renk koordinatları ve renk kuvvetleri Tablo 3'te verilmiştir. Bu veriler aynı zamanda yanıt yüzey metodolojisinde model analizlerinde kullanılmıştır.

Tablo 3. Boyanmış numunelerin renk koordinatları ve renk kuvvetleri

| Deney | Bağımsız değişkenler ve seviyeleri | | | Sonuçlar | | | | | |
|-------|------------------------------------|-----------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| | <i>pH</i> | <i>Sıcaklık</i> | <i>Süre</i> | <i>L*</i> | <i>a*</i> | <i>b*</i> | <i>C*</i> | <i>h</i> | <i>K/S</i> |
| 1 | 3 (-1) | 80 (-1) | 45 (0) | 90,09333 | -10,3347 | 47,8035 | 48,90795 | 102,1992 | 1,399381 |
| 2 | 3 (-1) | 80 (-1) | 45 (0) | 89,79808 | -9,64018 | 43,60518 | 44,65815 | 102,4663 | 1,163529 |
| 3 | 3 (-1) | 80 (-1) | 45 (0) | 89,98783 | -9,7575 | 41,75265 | 42,87778 | 103,1533 | 1,050196 |
| 4 | 7 (+1) | 120 (+1) | 45 (0) | 89,44085 | -2,1139 | 11,48723 | 11,68035 | 100,4274 | 0,18733 |
| 5 | 7 (+1) | 120 (+1) | 45 (0) | 89,80098 | -2,52178 | 11,24425 | 11,52355 | 102,6412 | 0,181059 |
| 6 | 7 (+1) | 120 (+1) | 45 (0) | 89,53995 | -2,7526 | 12,79883 | 13,09153 | 102,1385 | 0,213444 |
| 7 | 3 (-1) | 80 (-1) | 45 (0) | 88,89875 | -8,88215 | 48,81903 | 49,62128 | 100,31 | 1,558812 |
| 8 | 3 (-1) | 80 (-1) | 45 (0) | 90,3066 | -10,66 | 48,07025 | 49,23813 | 102,5037 | 1,416798 |
| 9 | 3 (-1) | 80 (-1) | 45 (0) | 90,27318 | -10,2717 | 43,9915 | 45,1749 | 103,1429 | 1,163344 |
| 10 | 7 (+1) | 120 (+1) | 45 (0) | 90,03223 | -1,76118 | 10,5419 | 10,6882 | 99,48678 | 0,157642 |
| 11 | 7 (+1) | 120 (+1) | 45 (0) | 88,85795 | -1,66305 | 11,8955 | 12,01125 | 97,95955 | 0,205528 |
| 12 | 7 (+1) | 120 (+1) | 45 (0) | 90,18225 | -1,29028 | 9,797425 | 9,882025 | 97,50235 | 0,144247 |
| 13 | 3 (-1) | 100 (0) | 30 (-1) | 89,41613 | -14,4957 | 52,58983 | 54,55108 | 105,4102 | 2,243593 |
| 14 | 3 (-1) | 100 (0) | 30 (-1) | 89,16023 | -11,9674 | 48,85483 | 50,2993 | 103,7642 | 1,770489 |
| 15 | 3 (-1) | 100 (0) | 30 (-1) | 88,76128 | -13,0704 | 48,69673 | 50,4204 | 105,0246 | 1,915456 |
| 16 | 7 (+1) | 100 (0) | 60 (+1) | 91,4724 | -4,9873 | 15,9163 | 16,67938 | 107,3984 | 0,235489 |
| 17 | 7 (+1) | 100 (0) | 60 (+1) | 91,55905 | -4,2403 | 13,372 | 14,0282 | 107,5939 | 0,186208 |
| 18 | 7 (+1) | 100 (0) | 60 (+1) | 91,13938 | -3,26913 | 13,68383 | 14,06895 | 103,4365 | 0,188667 |
| 19 | 3 (-1) | 100 (0) | 30 (-1) | 89,07858 | -11,5836 | 45,62505 | 47,07258 | 104,2458 | 1,595043 |
| 20 | 3 (-1) | 100 (0) | 30 (-1) | 89,23583 | -12,7504 | 46,7481 | 48,4557 | 105,2561 | 1,700053 |
| 21 | 3 (-1) | 100 (0) | 30 (-1) | 88,00453 | -8,91063 | 38,43108 | 39,4506 | 103,0536 | 1,095432 |
| 22 | 7 (+1) | 100 (0) | 60 (+1) | 91,57873 | -4,23728 | 14,54083 | 15,14563 | 106,2464 | 0,202364 |
| 23 | 7 (+1) | 100 (0) | 60 (+1) | 91,82735 | -4,9504 | 15,00385 | 15,79945 | 108,2601 | 0,210241 |
| 24 | 7 (+1) | 100 (0) | 60 (+1) | 91,68448 | -4,67133 | 14,61533 | 15,3438 | 107,7277 | 0,20314 |
| 25 | 5 (0) | 80 (-1) | 30 (-1) | 87,75168 | -4,17423 | 36,07168 | 36,31243 | 96,60093 | 0,863739 |
| 26 | 5 (0) | 80 (-1) | 30 (-1) | 86,94018 | -4,45235 | 43,0011 | 43,23105 | 95,91148 | 1,286302 |
| 27 | 5 (0) | 80 (-1) | 30 (-1) | 88,28365 | -5,713 | 38,14478 | 38,57023 | 98,5184 | 0,947413 |
| 28 | 5 (0) | 120 (+1) | 60 (+1) | 88,4345 | -15,062 | 47,74875 | 50,06805 | 107,5075 | 1,939565 |
| 29 | 5 (0) | 120 (+1) | 60 (+1) | 88,93428 | -13,9387 | 44,32325 | 46,4633 | 107,4574 | 1,572785 |
| 30 | 5 (0) | 120 (+1) | 60 (+1) | 89,1879 | -15,2012 | 45,75745 | 48,2164 | 108,3771 | 1,689121 |
| 31 | 5 (0) | 80 (-1) | 30 (-1) | 85,87425 | -3,63863 | 44,69058 | 44,8385 | 94,65485 | 1,491163 |
| 32 | 5 (0) | 80 (-1) | 30 (-1) | 87,51413 | -5,07205 | 43,00993 | 43,308 | 96,72695 | 1,271555 |
| 33 | 5 (0) | 80 (-1) | 30 (-1) | 87,51413 | -5,07205 | 43,00993 | 43,308 | 96,72695 | 1,271555 |
| 34 | 5 (0) | 120 (+1) | 60 (+1) | 88,80648 | -15,9017 | 48,71365 | 51,24335 | 108,0783 | 1,988114 |
| 35 | 5 (0) | 120 (+1) | 60 (+1) | 88,11593 | -14,1586 | 44,99785 | 47,17278 | 107,4662 | 1,746098 |
| 36 | 5 (0) | 120 (+1) | 60 (+1) | 89,2559 | -15,4613 | 46,55893 | 49,05898 | 108,3704 | 1,733642 |
| 37 | 5 (0) | 100 (0) | 45 (0) | 89,90273 | -11,8965 | 38,83113 | 40,61263 | 107,0331 | 1,065234 |
| 38 | 5 (0) | 100 (0) | 45 (0) | 90,4348 | -16,2782 | 48,6454 | 51,29678 | 108,5019 | 1,812039 |
| 39 | 5 (0) | 100 (0) | 45 (0) | 90,45735 | -16,216 | 49,50798 | 52,09615 | 108,1359 | 1,852613 |
| 40 | 5 (0) | 100 (0) | 45 (0) | 90,69725 | -13,974 | 41,74048 | 44,01753 | 108,5096 | 1,239927 |
| 41 | 5 (0) | 100 (0) | 45 (0) | 90,12125 | -14,079 | 43,19618 | 45,43268 | 108,0522 | 1,351423 |
| 42 | 5 (0) | 100 (0) | 45 (0) | 90,82283 | -16,6589 | 49,31183 | 52,04975 | 108,6664 | 1,766978 |
| 43 | 5 (0) | 100 (0) | 45 (0) | 90,0023 | -14,1403 | 42,68313 | 44,96445 | 108,3294 | 1,359903 |
| 44 | 5 (0) | 100 (0) | 45 (0) | 90,53945 | -16,4992 | 48,60673 | 51,3307 | 108,7495 | 1,766724 |
| 45 | 5 (0) | 100 (0) | 45 (0) | 90,2915 | -13,0086 | 37,71563 | 39,89613 | 109,0293 | 1,059857 |

Artan pH değerlerinin a^* ve b^* değerleri üzerindeki etkileri bunların azalarak gri bölgeye yaklaşması şeklinde iken, L^* değerlerindeki etkileri ise bunları artması şeklinde olmuştur. C^* değerlerini artan pH olumsuz etkilemiş, yani bu değerler artan pH ile azalmıştır. Özetle farklı pH değerlerinden farklı renk koordinatları elde edilmiştir. Bunun sebebi curcuminoid boyaların halokromik etki göstermesi, yani farklı pH değerlerine göre renklerinin değişmesidir (Lokhande ve Dorugade, 1995).

Boyama banyosu sıcaklığının artışı ile C^* , b^* ve K/S değerleri artış göstermiştir. Literatürde bunun nedeni yüksek sıcaklığın, lifin amorf bölgelerindeki polimer zincirlerinin hareketliliğini

arttırarak curcuminoid boya moleküllerinin lifin polimer zincirlerine kolayca yayılması ile açıklanmıştır (Kabir ve diğ., 2019). Sürenin renk koordinatları üzerindeki etkileri sıcaklık ve pH kadar belirgin olmamıştır. Bu durumda en koyu, doymun, ve sarıda renkler asidik bölgede yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen boyamalardan elde edilmiştir. Benzer sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalardan da elde edilmiştir (Aonfak ve diğ., 2016; Hasan ve diğ., 2014; Kabir ve diğ., 2019). Ayrıca literatürde uzun alifatik zincirlere sahip olan curcuminin hidrofobik Van der Waals etkileşimleri yoluyla poliesterle afinite gösterdiği ve bu boyanın poliesteri boyama davranışının dispers boyaların boyama davranışına benzediği belirtilmiştir (Lykidou ve diğ., 2021).

3.2. Yanıt Yüzey Metodolojisi Model Analizleri

Deneysel tasarım kısmında da belirtildiği gibi, $f(x, y)$ ilgili deney sonucunda elde edilen çıktıyı (L^* , a^* , b^* , C^* h ve K/S çıktılarında birisini), x ve y değişkenleri de gerçekleştirilen deneylerdeki girdilerden (pH, sıcaklık ve süre) modelde dikkate alınmakta olan ikiliyi göstermek üzere, deneysel veriler arasındaki matematiksel ilişkiler aşağıdaki kuadratik model eşitliği (Eşitlik 2) aracılığıyla incelenmiştir:

$$z = f(x, y) = \beta_{00} + \beta_{10}x + \beta_{01}y + \beta_{11}xy + \beta_{20}x^2 + \beta_{02}y^2 \quad (2)$$

Tablo 4'te model uyum sonuçları verilmektedir.

Tablo 4. Model uyum sonuçları

| Girdiler | Çıktı | R^2 | Karesel Hata |
|-----------------------|------------|--------|--------------|
| <i>pH, Sıcaklık</i> | b^* | 0,9820 | 2,4876 |
| | C^* | 0,9794 | 2,7667 |
| | <i>K/S</i> | 0,9597 | 0,1595 |
| <i>pH, Süre</i> | L^* | 0,9535 | 0,3410 |
| | a^* | 0,9002 | 2,0238 |
| | b^* | 0,9865 | 2,1542 |
| | C^* | 0,9853 | 2,3398 |
| | h | 0,9110 | 1,6015 |
| | <i>K/S</i> | 0,9035 | 0,2468 |
| | L^* | 0,9702 | 0,2730 |
| <i>Sıcaklık, Süre</i> | L^* | 0,9702 | 0,2730 |

Bu tabloda görüldüğü gibi, çalışma kapsamındaki deney sonuçları için oluşturulan kuadratik model kullanılarak bazı girdi-çıkı ilişkileri için yüksek uyum elde edilebilirken ($R^2 \geq 0,9$ gibi), bazıları için daha düşük seviyeler ortaya çıkmıştır. Bu bölümde, özellikle söz konusu yüksek uyum elde edilebilen modellere yönelik bazı sonuçlar sunulmuştur.

Bu bölümde Tablo 4'ten yüksek uyum elde edilen girdi-çıkı ilişkileri incelenmiştir. Girdi olarak pH ve sıcaklığın alınması durumunda, b^* , C^* ve *K/S* değerlerinin; pH ve sürenin alınması durumunda, L^* , a^* , b^* , C^* , h ve *K/S* değerlerinin; sıcaklık ve sürenin alınması durumunda ise sadece L^* değerinin istenen belirlilik katsayısı seviyesinde ($R^2 \geq 0,9$) tahmin performansına sahip olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, örneğin, pH ve sıcaklık girdi olarak alınmasıyla b^* değeri tahmin edilmek istenirse, Eşitlik 3 (Eş. 3) ile verilen modelin kullanılabilirliği

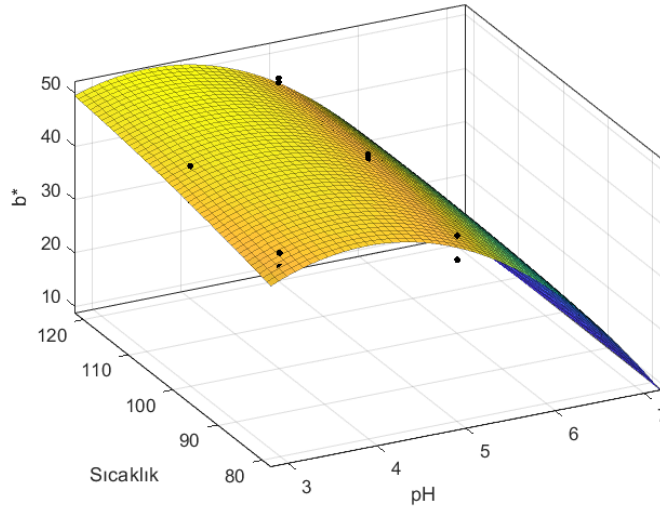
görülmektedir. Bu modelde, x ve y sırasıyla pH ve sıcaklığı, $f(x,y)$ ise b^* değerini göstermektedir.

$$z = f(x,y) = -40,38 + 29,7100x + 0,5784y - 0,0389xy - 3,4500x^2 - 0,0016y^2 \quad (3)$$

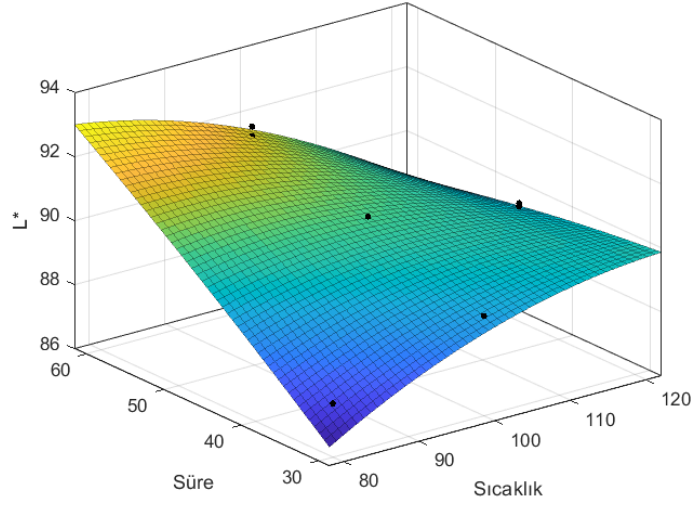
Benzer şekilde, L^* değerinin hem pH ve sürenin girdi olarak alınmasıyla ve hem de sıcaklık ve sürenin girdi olarak alınmasıyla istenen uyum seviyesinde tahmin edilebildiği görülmektedir. Buna yönelik olarak, örneğin L^* değerinin sıcaklık ve sürenin girdi olarak alınmasıyla tahmin edildiği model Eşitlik 4 (Eş. 4) ile verilmiş olup, burada x ve y sırasıyla sıcaklık-süre ikilisine karşılık gelmekte olup, $f(x,y)$ ise L^* değerini göstermektedir. Aşağıda bu iki çıktının yüzey grafikleri örnek olarak verilmiştir. Şekil 4'te boyama sonrasında elde edilen b^* değerinin pH ve sıcaklığa göre, Şekil 5'te ise L^* değerlerinin sıcaklık ve süreye bağlı değişimi görülmektedir.

$$z = f(x,y) = 48,34 + 0,5237x + 0,6571y - 0,0053xy - 0,0015x^2 - 0,0005y^2 \quad (4)$$

Eşitlik 4 (Eş. 4) ile verilen son model incelendiğinde, sıcaklık ve süre girdileri kullanılarak, L^* değerinin bu meta-model aracılığıyla tahmin edilebileceği görülmektedir. Bu model ile oluşturulan çıktılar deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, minimum ve maksimum mutlak hata değerlerinin sırasıyla 91,39 L^* değerinden 0,0077 ve 87,659 L^* değerinden 0,4913 mutlak farkla gerçekleştiği ve ortalama 0,1720 mutlak hata ile L^* değerlerinin tahmin edilebildiği görülmektedir. Diğer girdi-çıkı kombinasyonları için de benzer analizler gerçekleştirilebilir.



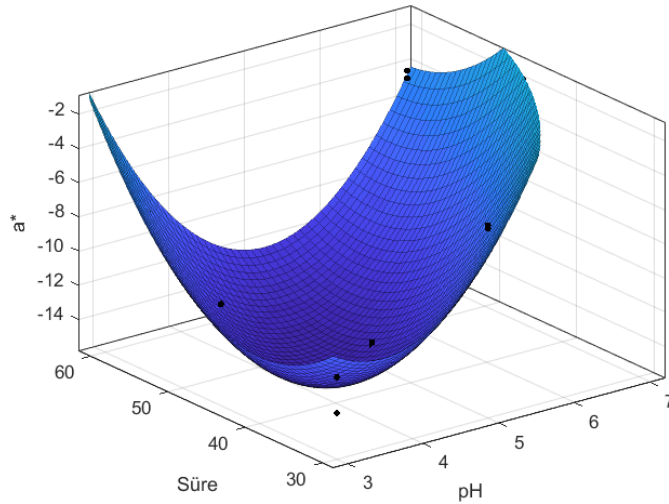
Şekil 4:
 b^ değerinin pH ve sıcaklığa göre değişimi*



Şekil 5:
L değerinin sıcaklık ve süreye göre değişimi*

Bu bölümün ilerleyen kısımlarında, YYM modelinin optimizasyonuna yönelik bazı analizler sunulmaktadır. Bu kapsamda, çalışmanın sayfa sayısını da istenen seviyenin altında tutabilmek amacıyla sırasıyla konveks ve konkav fonksiyonlara karşılık gelecek şekilde sonuçlar arasından pH ve sürenin a^* değeri ile pH ve sıcaklığın C^* değeri örnek olarak ele alınmış ve bunlara yönelik modeller optimize edilerek sunulmuştur. Farklı durumlara karşılık gelen analizler de benzer şekilde gerçekleştirilebilir.

Gerçekleştirilen deneysel tasarım sonucunda ele alınan ilk örnek olarak pH ve süre artışının a^* değerlerinin değişimine etkileri incelendiğinde, bu ilişkinin aşağıdaki kuadratik modelle ($R^2 \cong 0,9$) incelenebileceği görülmektedir. Bu ilişki ve buna yönelik oluşturulan modelin grafiği Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6:
a değerinin pH ve süreye göre değişimi*

Şekil 6'dan da görüldüğü gibi, a^* değerinin, pH ve sürenin uç değerlerine yaklaştıkça artmakta (kötüleştirmek) olduğu, bir diğer ifadeyle, a^* değerinin pH ve sürenin artışıyla öncelikle azaldığı, minimum değerine ulaştığı ve daha sonra artmaya başladığı görülmektedir. Deney sonuçlarına göre, a^* değerinin minimuma ulaştığı noktanın koordinatları yaklaşık olarak aşağıda detayları sunulduğu gibi 4,5 pH ve 47,5 dakika koşullarında yaklaşık olarak $-15,7$ olarak elde edilmektedir.

Bu kapsamda, önerilen model, x ve y sırasıyla pH ve süreyi, $f(x, y)$ ise a^* değerini göstermek üzere, Eşitlik 5 (Eş. 5) ile ifade edilebilir.

$$z = f(x, y) = 26,60 - 8,2990x - 0,9985y - 0,2407xy + 2,1950x^2 + 0,0219y^2 \quad (5)$$

Eşitlik 5 (Eş. 5) düzenlenerek ve değişkenlere ait sınırlar eklendiğinde, Eşitlik 6 (Eş. 6) ve Eşitlik 7 (Eş. 7) ile (değişken sınırları dışında) sınırlanmamış kuadratik program ifade edilmektedir.

$$z = f(x, y) = 2,1950x^2 + 0,0219y^2 - 0,2407xy - 8,2990x - 0,9985y + 26,60 \quad (6)$$

$$: 3 \leq x \leq 14 \text{ ve } 30 \leq y \leq 60 \quad (7)$$

Buna bağlı olarak,

$$J(x, y) = \begin{bmatrix} + & 4,390x & - & 0,2407y & - & 8,2990 \\ - & 0,2407x & + & 0,0438y & - & 0,9985 \end{bmatrix} \quad (8)$$

ve

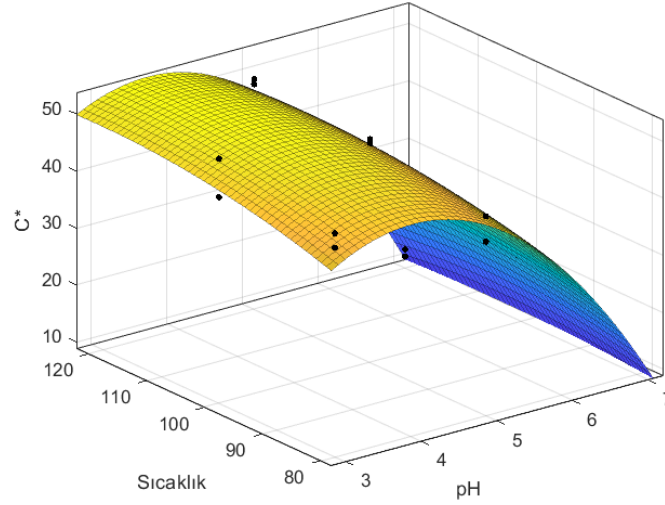
$$H(x, y) = \begin{bmatrix} +4,3900 & -0,24070 \\ -0,2407 & +0,04380 \end{bmatrix} \quad (9)$$

olup konveks $f(x, y)$ için,

$$(x, y)^T = (4,4929, 47,4658)^T \Rightarrow f(x, y) = -15,7408 \quad (10)$$

optimal (minimum) çözüm olarak elde edilmektedir.

Benzer şekilde, deneysel tasarım sonucunda ele alınan ikinci örneğimiz olarak pH ve sıcaklık artışının C^* değerlerinin değişimine etkileri incelendiğinde, bu ilişkinin de aşağıdaki kuadratik modelle incelenebileceği ($R^2 \cong 0,979$) görülmektedir. Bu ilişki ve buna yönelik oluşturulan modelin grafiği Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7:
C değerinin pH ve Sıcaklığa göre değişimi*

Şekil 7’den görüldüğü gibi, C* değerinin, pH ve sıcaklığın uç değerlerine yaklaştıkça azalmakta (kötüleşmekte) olduğu, bir diğer ifadeyle, C* değerinin pH ve sıcaklığın artışıyla öncelikle arttığı, maksimum değerine ulaştığı ve daha sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Söz konusu azalmanın özellikle artan pH değerleri için daha net bir şekilde gözlemlendiği ifade edilebilir. Deney sonuçlarına göre, C* değerinin maksimuma ulaştığı noktanın koordinatları yaklaşık olarak aşağıda detayları sunulduğu gibi 3,7 pH ve 115,4 °C sıcaklık koşullarında yaklaşık olarak 53,3 olarak elde edilmektedir.

Bu kapsamda, x ve y sırasıyla pH ve sıcaklığı, $f(x, y)$ ise C* değerini göstermek üzere, Eşitlik 11 (Eş. 11) ile ifade edilebilir.

$$z = f(x, y) = -66,82 + 31,0300x + 1,0740y - 0,0240xy - 3,7700x^2 - 0,0040y^2 \quad (11)$$

Eşitlik 11 (Eş. 11) düzenlenerek ve değişkenlere ait sınırlar eklendiğinde, Eşitlik 12 (Eş. 12) ve Eşitlik 13 (Eş. 13) ile (değişken sınırları dışında) sınırlanılmamış kuadratik program ifade edilmektedir.

$$z = f(x, y) = -3,7700x^2 - 0,0040y^2 - 0,0240xy + 31,0300x + 1,0740y - 66,82 \quad (12)$$

$$: 3 \leq x \leq 14 \text{ ve } 80 \leq y \leq 130 \quad (13)$$

Buna bağlı olarak,

$$J(x, y) = \begin{bmatrix} -7,540x - 0,024y + 31,030 \\ -0,024x - 0,008y + 1,074 \end{bmatrix} \quad (14)$$

ve

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} -7,540 & -0,024 \\ -0,024 & -0,008 \end{bmatrix} \quad (15)$$

olup konkav $f(x, y)$ için,

$$(x, y)^T = (3,749,115,359)^T \Rightarrow f(x, y) = 53,295 \quad (16)$$

optimal (maksimum) çözüm olarak elde edilmektedir.

Gerçekleştirilen analizler diğer girdi-çıkıtkombinasyonları için de tekrarlanabilir. Çalışmanın sayfa sayısını sınırlandırmak amacıyla diğer girdi ve çıktılar için ilgili matematiksel detaylar sunulmamış, bunun yerinde, örnek olarak sadece modelleri verilmiş olan çıktılardan b^* değerine yönelik olarak teorik optimal girdi değerleri belirlenmiş ve sunulmuştur. Örneğin, önceki sayfalarda sunulmuş olan yüksek uyumlu modellerden Eşitlik 3 (Eş. 3) ile verilen model sınır değerleri altında optimize edildiğinde, optimal b^* değeri $f(x, y) = 51,8704$, $(x, y)^T = (3,5756,130)^T$ noktasında elde edilmiştir. Bir diğer ifadeyle maksimum b^* değerinin elde edildiği teorik pH ve sıcaklık değerleri sırasıyla 3,5756 ve 130 °C olarak bulunmuştur. Öte yandan, b^* çıktısı için teorik optimal çözümlerin sınır değerlerde oluştuğu (130 °C sıcaklıkta) görülmekte olup, bu sonuçların gelecek çalışmalarda yapılacak deneylerle doğrulanması ele alınabilir.

3.3. Yıkama haslığı

Poliesterin doğal boyamasına ait yıkama haslığı sonuçları Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Yıkama haslığı sonuçları

| | Yıkama | | | | | | Solma |
|----------------|--------|----|----|-----|-----|----|-------|
| | CA | CO | PA | PES | PAN | WO | |
| pH 3-80°C-45' | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| pH 3-100°C-30' | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| pH 5-80°C-30' | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| pH 5-100°C-45' | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| pH 5-120°C-60' | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| pH 7-100°C-60' | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| pH 7-120°C-45' | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |

Doğal boyalarla boyanan poliester kumaşın yıkama haslığı değerleri mükemmel seviye çıkmıştır. Yıkamadan sonra boyalı kumaşların renklerinde de herhangi bir değişme görülmemiş, solma değerleri yine mükemmel seviyede çıkmıştır. Mükemmel yıkama haslığı sonuçları, boyanın substratlara güçlü bir şekilde bağlandığını ve doğal renklendiricinin sadece yüzeysel olarak değil, aynı zamanda liflere nüfuz ettiğini de göstermiştir (Kabir ve diğ., 2019; Lykidou ve diğ., 2021). Literatürde de bu doğal boya ile yapılan boyama çalışmalarında çok iyi seviyede haslık değerleri elde edilmiştir (Hasan ve diğ., 2014; Shukla ve Vankar, 2018).

4. SONUÇ

Bu çalışmanın nihai amacı, PET kumaşın doğal boyalarla çevre dostu bir şekilde boyanabilirliğini araştırmak ve işlem parametrelerinin optimizasyonu Yanıt Yüzey Metodoloji ile istatistiksel olarak araştırmaktır. Deneysel çalışmalar Box-Behnken tasarımından baz alınarak hazırlanan deneysel tasarımla yürütülmüştür. Tasarımda pH, sıcaklık ve süreden oluşan üç faktör kullanılmıştır. Sonuçlar kolorimetre açısından incelendiğinde PET kumaşın yardımcı herhangi bir kimyasal madde kullanmadan açık ve orta tonlarda da olsa boyanabileceğini göstermiştir. Ayrıca farklı koşullarda yürütülen boyama çalışmalarından en sarıda, doymuş ve koyu renklerin yaklaşık olarak yüksek sıcaklıkta asidik bölgede yapılan boyamalardan elde edildiği görülmüştür. Renk koordinatları (L^* , a^* , b^* , C^*) ve renk kuvvetleri (K/S) çıktıları gerçekleştirilen deney sonuçlarına bağlı olarak tahmin etmek için kullanılabilecek bir meta model oluşturmak amacıyla yapılan incelemelerde ise ikinci dereceden bir modelin deney sonuçlarını tahmin etmede genel olarak başarılı olduğu görülmüştür ($R^2 \geq 0,9$). Ayrıca bu model denklemlerinden teorik optimal boyama koşullarının yanı sıra poliesterin boyanmasında, pH-sıcaklık ve pH-süre ikililerinin, sıcaklık-süre ikilisine göre çok daha etkili olduğu da tespit edilmiştir. Özet olarak; bu çalışma (i) poliesterin *Curcuma longa* (zerdeçal) ile boyanabildiğini, (ii) optimizasyon için kullanılan Yanıt Yüzey Metodolojisi yaklaşımında başarı sağlandığı, (iii) teorik olarak da olsa optimal boyama koşullarının tespit edilmesinin araştırmacılar için maliyet ve zaman tasarrufu sağlama potansiyeli olduğunu göstermiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

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

YAZAR KATKISI

Çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması ve yazılması Tuba Toprak Çavdur ve Fatih Çavdur tarafından yapılmıştır. Tolga Çelik, veri toplama kısmında çalışmaya dahil olmuştur. Her üç yazar da makalenin son taslağını okumuş ve onaylamıştır.

KAYNAKÇA

1. Abate, T. M., 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. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104703>
2. Affat, S. S. (2021) Classifications, Advantages, Disadvantages, Toxicity Effects of Natural and Synthetic Dyes: A review, *University of Thi-Qar Journal of Science*, 8(1), 130–135. <http://doi.org/10.32792/utq/utjsci/v8/1/21>
3. Aizenshtein, E. M. (2006) World Production and Consumption of Polyester Fibres and Thread, *Fibre Chemistry*, 38(3), 264–271. <https://doi.org/10.1007/s10692-006-0081-5>
4. Akgun, M., Becerir, B., & Alpay, H. R. (2014) Reflectance Prediction of Colored Polyester Fabrics by A Novel Formula, *Fibers and Polymers*, 15(1), 126–137. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-0126-y>
5. Antczak, A., Greta, M., Kopeć, A., & Otto, J. (2019) Characteristics of the Textile Industry of Two Asian Powers: China and India. Prospects for their Further Development on Global

- Markets, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 137(5), 9–14. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.2895>
6. Aonfak, K., Kanakiat, N., Uttarat, P., Pingaew, R., & Kaenthong, S. (2016) Dyeing Polyester Fabrics with Curcumin using Infrared Dyeing Machine, *Burapha Science Journal*, 21(3), 23–37.
 7. Armalina, Y., Azizah, Z., & Asra, R. (2020) The Degradation Rates of Natural Dyes from Natural Resources: A Review, *Asian Journal of Pharmaceutical Research and Development*, 8(5), 75–81. <https://doi.org/10.22270/ajprd.v8i5.827>
 8. Basak, S., Samanta, K. K., Chattopadhyay, S. K., Pandit, P., & Maiti, S. (2016) Green Fire Retardant Finishing and Combined Dyeing of Proteinous Wool Fabric, *Coloration Technology*, 132(2), 135–143. <https://doi.org/10.1111/cote.12200>
 9. Boominathan, S., Karthi, V., & Balakrishanan, S. (2022) Optimization of Process Parameters on Color Strength and Antimicrobial Activities of Cotton Fabric Dyed with *Rubia cordifolia* Extract, *Journal of Natural Fibers*, 19(7), 2414–2428. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1818347>
 10. Chakraborty, J. N. (2010) Dyeing with Disperse Dye, in *Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles*, 192–201. Woodhead Publishing India Pvt. Ltd.
 11. Chakraborty, J. N. (2014a) Dyeing of Polyester, in *Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles*, edited by J. N. Chakraborty, 271–300. Woodhead Publishing India Pvt. Ltd.
 12. Chakraborty, J. N. (2014b) Dyeing with Natural Dyes, in *Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles*, edited by J. N. Chakraborty, 233–261. Woodhead Publishing India Pvt. Ltd.
 13. Chao, Y. chan, Ho, T. han, Cheng, Z. jiao, Kao, L. heng, & Tsai, P. szu. (2017) A Study on Combining Natural Dyes and Environmentally-friendly Mordant to Improve Color Strength and Ultraviolet Protection of Textiles, *Fibers and Polymers*, 18(8), 1523–1530. <https://doi.org/10.1007/s12221-017-6964-7>
 14. Datta, S., Uddin, M., Afreen, K., Akter, S., & Bandyopadhyay, A. (2013) Assessment of Antimicrobial Effectiveness of Natural Dyed Fabrics, *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 48(3), 179–184. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v48i3.17327>
 15. de Oliveira Neto, G. C., Ferreira Correia, J. M., Silva, P. C., de Oliveira Sanches, A. G., & Lucato, W. C. (2019) Cleaner Production in the Textile Industry and Its Relationship to Sustainable Development Goals, *Journal of Cleaner Production*, 228, 1514–1525. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.334>
 16. DeGuzman, M. (2020). *IHS Markit's Chemical Economics Handbook – Polyester Fibers*. Erişim adresi: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/polyester-fibers-chemical-economics-handbook.html> (Erişim tarihi: 22.12.2023)
 17. Elnagar, K., Abou Elmaaty, T., & Raouf, S. (2014) Dyeing of Polyester and Polyamide Synthetic Fabrics with Natural Dyes Using Ecofriendly Technique, *Journal of Textiles*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/363079>
 18. Fernández, L. (2021). *Polyester Fiber Production Globally 1975-2020*. Erişim adresi: <https://www.statista.com/statistics/912301/polyester-fiber-production-worldwide/#statisticContainer> (Erişim tarihi: 22.12.2023)
 19. Ghaheh, F. S., Moghaddam, M. K., & Tehrani, M. (2021) Comparison of the Effect of Metal Mordants and Bio-Mordants on the Colorimetric and Antibacterial Properties of Natural Dyes on Cotton Fabric, *Coloration Technology*, 137(6), 689–698. <https://doi.org/10.1111/cote.12569>
 20. Guha, A. K. (2018) A Review on Cleaner Production in Textiles, *International Journal of Textile Science*, 7(4), 90–93. <https://doi.org/10.5923/j.textile.20180704.02>
 21. Gupta, D., Khare, S. K., & Laha, A. (2004) Antimicrobial Properties of Natural Dyes against Gram-negative Bacteria, *Coloration Technology*, 120(4), 167–171.

- <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2004.tb00224.x>
22. Hadiyat, M. A., Sopha, B. M., & Wibowo, B. S. (2022). Response Surface Methodology Using Observational Data: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 12, 10663. <https://doi.org/10.3390/app122010663>
 23. Haji, A., & Naebe, M. (2020) Cleaner Dyeing of Textiles Using Plasma Treatment and Natural Dyes: A Review, *Journal of Cleaner Production*, 265, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121866>
 24. Hasan, M., Hossain, M.B., Azim, A.Y.M.A., Ghosh, N.C., Reza, S. (2014) Application of Purified Curcumin as Natural Dye on Cotton and Polyester, *International Journal of Engineering & Technology*, 14(5), 17–23. <https://doi.org/10.1155/2015/932627>
 25. Hosen, D., Rabbi, F., Raihan, A., & Mamun, A. Al. (2021) Effect of Turmeric Dye and Biomordants on Knitted Cotton Fabric Coloration: A Promising Alternative to Metallic Mordanting, *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100124. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100124>
 26. Husien, S., El-taweel, R. M., Salim, A. I., Fahim, S. I., Said, L. A., & Radwan, A. G. (2022). Review of Activated Carbon Adsorbent Material for Textile Dyes Removal: Preparation, and Modelling. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, 100325. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100325>
 27. Ibrahim, N. A., El-zairy, W. M., El-zairy, M. R., & Ghazal, H. A. (2013) Enhancing the UV-protection and Antibacterial Properties of Polyamide-6 Fabric by Natural Dyeing, *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, 2(1), 36–41.
 28. Jabar, J. M., Ogunmokun, A. I., & Taleat, T. A. A. (2020) Color and Fastness Properties of Mordanted *Bridelia ferruginea* B Dyed Cellulosic Fabric, *Fashion and Textiles*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40691-019-0195-z>
 29. Kabir, S. M. M., Hasan, M. M., & Uddin, M. Z. (2019) Novel Approach to Dye Polyethylene terephthalate (PET) Fabric in Supercritical Carbon dioxide with Natural Curcuminoid Dyes, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 27(3), 65–70. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.0744>
 30. Karthik, T., & Gopalakrishnan, D. (2014) Environmental Analysis of Textile Value Chain: An Overview, in *Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing: Environmental and Social Aspects of Textile and Clothing Supply Chain*, edited by S. S. Muthu, 153–188. Springer.
 31. Kerkeni, A., Behary, N., Perwuelz, A., & Gupta, D. (2012) Dyeing of Woven Polyester Fabric with Curcumin: Effect of Dye Concentrations and Surface Pre-activation using Air Atmospheric Plasma and Ultraviolet Excimer Treatment, *Coloration Technology*, 128, 223–229. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2012.00367.x>
 32. Khan, M. M. R., & Islam, M. M. (2015) Materials and Manufacturing Environmental Sustainability Evaluation of Apparel Product: Knitted T-shirt Case Study, *Textiles and Clothing Sustainability*, 1(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40689-015-0008-8>
 33. Khan, S. A., Ahmad, A., Khan, M. I., Yusuf, M., Shahid, M., Manzoor, N., & Mohammad, F. (2012) Antimicrobial Activity of Wool Yarn Dyed with *Rheum emodi* L. (Indian Rhubarb), *Dyes and Pigments*, 95(2), 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2012.04.010>
 34. Koh, J. (2011) Dyeing with Disperse Dyes, in *Textile Dyeing*, edited by P. Hauser, 195–220). InTechOpen.
 35. Lee, K. E. (2017) Environmental Sustainability in the Textile Industry, in *Sustainability in the Textile Industry*, edited by S.S.Muthu, 17–56. Springer.
 36. Liman, M. L. R., Islam, M. T., Hossain, M. M., & Sarker, P. (2020) Sustainable Dyeing Mechanism of Polyester with Natural Dye Extracted from Watermelon and Their UV Protective Characteristics, *Fibres and Polymers*, 21(10), 2301–2313. <https://doi.org/10.1007/s12221-020-1135-7>
 37. Liu, S., Liu, Y. K., Lo, C., & Kan, C. (2024). Intelligent Techniques and Optimization Algorithms in Textile Colour Management: A Systematic Review of Applications and

- Prediction accuracy. *Fashion and Textiles*, 11(13), 1–38. <https://doi.org/10.1186/s40691-024-00375-x>
38. Lokhande, H. T., & Dorugade, V. A. (1999) Dyeing Nylon With Natural Dyes, *American Dyestuff Reporter*, 34(7), 29–34.
 39. Lykidou, S., Pashou, M., Vouvoudi, E., & Nikolaidis, N. (2021) Study on the Dyeing Properties of Curcumin on Natural and Synthetic Fibers and Antioxidant and Antibacterial Activities, *Fibers and Polymers*, 22(12), 3336–3342. <https://doi.org/10.1007/s12221-021-0412-4>
 40. Manesa, K. C., & Dyosi, Z. (2023) Review on Moringa oleifera , A Green Adsorbent for Contaminants Removal : Characterization , Prediction , Modelling and Optimization using Response Surface Methodology (RSM) and Artificial Neural Network (ANN), *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic / Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 58(13), 1014–1027. <https://doi.org/10.1080/10934529.2023.2291977>
 41. Nnaji, C. P., Anadebe, V. C., Onukwuli, O. D., Okoye, C. C., & Ude, J. C. (2022) Multifactor Optimization for Treatment of Textile Wastewater using Complex Salt – Luffa cylindrica Seed Extract (CS - LCSE) as Coagulant : Response Surface Methodology (RSM) and Artificial Intelligence Algorithm (ANN – ANFIS), *Chemical Papers*, 76(4), 2125–2144. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01971-7>
 42. Pizzicato, B., Pacifico, S., Cayuela, D., Mijas, G., & Riba-Moliner, M. (2023) Advancements in Sustainable Natural Dyes for Textile Applications: A Review, *Molecules*, 28(16), 5954. <https://doi.org/10.3390/molecules28165954>
 43. Purwar, S. (2016) Application of Natural Dye on Synthetic Fabrics : A Review, *International Journal of Home Science*, 2(2), 283–287.
 44. Rahman Bhuiyan, M. A., Ali, A., Islam, A., Hannan, M. A., Fijul Kabir, S. M. F., & Islam, M. N. (2018) Coloration of Polyester Fiber with Natural Dye Henna (*Lawsonia inermis* L.) without using Mordant: A New Approach Towards A Cleaner Production, *Fashion and Textiles*, 5(2), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40691-017-0121-1>
 45. Ranasinghe, L., & Jayasooriya, V. M. (2021) Ecolabelling in Textile Industry: A review, *Resources, Environment and Sustainability*, 6, 100037. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100037>
 46. Rani, N., Jajpura, L., & Butola, B. S. (2020) Ecological Dyeing of Protein Fabrics with Carica papaya L. Leaf Natural Extract in the Presence of Bio-mordants as an Alternative Copartner to Metal Mordants, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*, 101(1), 19–31. <https://doi.org/10.1007/s40034-020-00158-1>
 47. Samanta, A. K., & Agarwal, P. (2009) Application of Natural Dyes on Textiles, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 34(4), 384–399.
 48. Sarabia, L. A., & Ortiz, M. C. (2009) Response Surface Methodology in *Comprehensive Chemometrics: Chemical and Biochemical Data Analysis*, edited by S. D. Brown, R. Tauler, & B. Walczak, 345–390. Elsevier.
 49. Saxena, S., & Raja, A. S. M. (2014a) Natural Dyes: Sources, Chemistry, Application and Sustainability Issues, in *Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing*, edited by S.S. Muthu, 37–80. Springer.
 50. Saxena, S., & Raja, A. S. M. (2014b) Natural Dyes: Sources, Chemistry, Application and Sustainability Issues, in *Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing Eco-friendly Raw Materials, Technologies, and Processing Methods*, edited by S.S. Muthu, 37–80. Springer.
 51. Sen, A., Bhowal, A., & Datta, S. (2018) Comparison of Dyeing of Polyester Fibers with Natural Dye and Bio-mordant, *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 11(3), 165–172. <https://doi.org/10.30509/PCCC.2018.76663>
 52. Shahid-Ul-Islam, Shahid, M., & Mohammad, F. (2013) Perspectives for Natural Product Based Agents Derived from Industrial Plants in Textile Applications - A Review, *Journal of Cleaner Production*, 57, 2–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.004>

53. Shahid, M., Shahid-ul-Islam, & Mohammad, F. (2013) Recent Advancements in Natural Dye Applications: A Review, *Journal of Cleaner Production*, 53, 310–331. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.031>.
54. Shahin, M., Ahmed, R. M., & Marie, M. M. (2014) Optimizing the Dyeing Process of Alkali-Treated Polyester Fabric with Dolu Natural Dye, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(6), 35–40.
55. Shin, Y., & Yoo, D. (2012) Storage Stability and Color Reproducibility of Yellow and Red Dyes Extracted from *Carthamus tinctorius* L, *Textile Coloration and Finishing*, 24(3), 165–172. <https://doi.org/10.5764/tcf.2012.24.3.165>
56. Shukla, D., & Vankar, P. S. (2018) Curcuma Dye with Modified Treatment Using Chitosan for Superior Fastness, *Fibers and Polymers*, 19(9), 1913–1920. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-8120-4>
57. Sk, S., Mia, R., Haque, A., & Shamim, A. M. (2021) Review on Extraction and Application of Natural Dyes, *Textile and Leather Review*, 4(4), 218–233. <https://doi.org/10.31881/TLR.2021.09>
58. Toprak, T., & Anis, P. (2017) Textile Industry’s Environmental Effects and Approaching Cleaner Production and Sustainability: an Overview, *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 2(4), 429–442. <https://doi.org/10.15406/jteft.2017.02.00066>
59. Vadood, M., & Haji, A. (2022) A Hybrid Artificial Intelligence Model to Predict the Color Coordinates of Polyester Fabric Dyed with Madder Natural Dye, *Expert Systems with Applications*, 193, 116514. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116514>
60. Vankar, P. S., & Shukla, D. (2019) Newer Natural Dyes for Various Textiles, in *New Trends in Natural Dyes for Textiles*, 1–29. Elsevier.
61. Yacout, D. M. M., & Hassouna, M. S. (2016) Identifying Potential Environmental Impacts of Waste Handling Strategies in Textile Industry, *Environmental Monitoring and Assessment*, 188 (445), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5443-8>
62. Yusuf, M., Shabbir, M., & Mohammad, F. (2017) Natural Colorants: Historical, Processing and Sustainable Prospects, *Natural Products and Bioprospecting*, 7(1), 123–145. <https://doi.org/10.1007/s13659-017-0119-9>
63. Zhou, Y., Yu, J., Biswas, T. T., Tang, R.-C., & Nierstrasz, V. (2019) Inkjet Printing of Curcumin-Based Ink for Coloration and Bioactivation of Polyamide, Silk, and Wool Fabrics, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(2), 2073–2082. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04650>