

Araştırma Makalesi / Research Article

DOĞAL VE REJENERE SELÜLOZİK İPLİKLERDE SUPRAMOLEKÜLER LİF MORFOLOJİSİNİN BOBİN BOYAMA PERFORMANSI VE RENK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Mehmet ŞAHİN^{1*} 

¹Harran Üniversitesi OSB MYO Tekstil Teknoloji Programı, Şanlıurfa, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 08.06.2026

Kabul Tarihi / Accepted: 26.08.2026

ÖZ: Farklı supramoleküler morfolojilere sahip selülozik ipliklerin paket boyama performanslarının spektrofotometrik olarak incelendiği bu çalışmada, liflerin mikroyapısal dinamikleri ile makro düzeydeki renk algısı arasındaki doğrusal etkileşimler net bir şekilde ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular ışığında, referans renk tonuna en yakın koordinatları sergileyen ve optimum renk uyumu sunan numunenin %50-%50 Pamuk-Keten karışım ipliği ($\Delta E^* = 1,05$ NSB) olduğu; pamuk elyafının yapıya dâhil edilmesiyle ketenin yüksek kristalinitesinden kaynaklanan boyanma dezavantajının başarıyla kompanse edildiği tespit edilmiştir. Rejenere selülozik lifler grubunda ise %100 Tencel ipliğinin ($\Delta E^* = 1,28$ NSB) dairesel kesit geometrisi ve pürüzsüz yüzey morfolojisinin yarattığı standart ışık yansımaları sayesinde %100 Viskon ipliğine ($\Delta E^* = 2,02$ NSB) kıyasla referans renge çok daha yakın bir optik performans sergilediği belirlenmiştir. Buna karşın, sıkı paketlenmiş kristal yapısı ve yüksek yüzey pürüzlülüğü nedeniyle referans renkten en yüksek sapmayı %100 Keten ipliği ($\Delta E^* = 3,99$ NSB) gösterirken; analiz edilen tüm iplik türlerinin spektrofotometrik olarak endüstriyel kabul sınırlarının dışında kalması ("KALDI" çıktısı), selülozik iplik boyama proseslerinde elyaf türüne özgü özel sarım gerginliği, banyo reçetesi ve fiksaj optimizasyonlarının yapılmasının mutlak bir gereklilik olduğunu kanıtlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Bobin Boyama, Selülozik Lifler, Supramoleküler Morfoloji, Spektrofotometri, Renk Farkı

EFFECT OF SUPRAMOLECULAR FIBER MORPHOLOGY ON PACKAGE DYEING PERFORMANCE AND COLOR PROPERTIES OF NATURAL AND REGENERATED CELLULOSIC YARNS

ABSTRACT: In this study, where the package dyeing performances of cellulosic yarns with different supramolecular morphologies were spectrophotometrically examined, the linear interactions between the microstructural dynamics of the fibers and the macro-level color perception were clearly revealed. In light of the findings obtained, it was determined that the sample exhibiting the closest coordinates to the reference color tone and offering optimum color harmony was the 50%-50% Cotton-Linen blended yarn ($\Delta E^* = 1,05$ NSB); the dyeing disadvantage arising from the high crystallinity of linen was successfully compensated by incorporating cotton fiber into the structure. Among the regenerated cellulosic fibers group, it was determined that the 100% Tencel yarn ($\Delta E^* = 1,28$ NSB), thanks to the standard light reflections created by its circular cross-sectional geometry and smooth surface morphology, exhibited a much closer optical performance to the reference color compared to the 100% Viscose yarn ($\Delta E^* = 2,02$ NSB). In contrast, due to its tightly packed crystalline structure and high surface roughness, the 100% Linen yarn ($\Delta E^* = 3,99$ NSB) showed the greatest deviation from the reference color; moreover, the fact that all analyzed yarn types remained outside the industrial acceptance limits spectrophotometrically ("FAILED" output) proved that specific winding tension, bath recipe, and fixation optimizations unique to the fiber type are an absolute necessity in cellulosic yarn dyeing processes.

Keywords: Coil Dyeing, Cellulosic Fibers, Supramolecular Morphology, Spectrophotometry, Color Difference

***Sorumlu Yazarlar/Corresponding Authors:** mehmetshahin@harran.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.7216/tekstilmuh.1966830>

www.tekstilmuhendis.org.tr

1. GİRİŞ

Tekstil ürünlerinde renklendirme işlemi; elyaf çözeltisi, kesikli elyaf, tops (tarama bandı), iplik, kumaş ve hazır giysi olmak üzere altı farklı morfolojik aşamada gerçekleştirilmektedir [1,2]. Maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik kriterleri dikkate alındığında elyaf boyama yöntemi ön plana çıksa da [3], iplik boyama prosesi de en az elyaf renklendirme kadar kritik bir öneme sahiptir [4]. Ayrıca, iplik formunda gerçekleştirilen boyama işlemlerinin, nihai ürünün fiziksel performans ve test değerleri üzerinde daha optimize sonuçlar verdiği bilinmektedir [4]. Hem teknik hem de ekonomik avantajları bir arada sunan iplik (bobin) boyama, günümüz tekstil endüstrisinde oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir [4].

Çile boyama sistemleri ile mukayese edildiğinde, bobin boyama prosesinde sargı matrisi genelinde oluşan yüksek yoğunluk ve gerginlik (tansiyon) varyasyonları, ipliğin hacimlilik ve tuşe (yumuşaklık) özelliklerini sınırlayabilmektedir. Buna karşın, iplik boyama sonrasında ek bir ara işleme gereksinim duyulmaksızın kurutma prosesine geçilebilmesi ve ticari sert sarım aşamasının ardından doğrudan dokuma veya örme hatlarına aktarılabilmesi, bu yöntemi zaman yönetimi açısından oldukça avantajlı kılmaktadır [5]. Bu sistemde iplikler, kontrollü bir yoğunlukta delikli boya masuralarına aktararak gevşek (yumuşak) sarım formunda boyama prosesine sevk edilir [6]. Renklendirme işlemi, boya masuraların perforasyonlu yapısı sayesinde içten-dışa ve dıştan-içe yönlü basınç sirkülasyonu (likör penetrasyonu) prensibiyle gerçekleştirilir [7].

Literatürde iplik boyama alanında yürütülen çalışmalar incelendiğinde; genel olarak maliyet, hammadde optimizasyonu, proses süresi ve kimyasal tüketimi gibi parametrelere odaklanıldığı görülmektedir [8]. Söz konusu araştırmalar, bobin boyama kalitesini ve renk düzgünlüğünü olumsuz etkileyen değişkenleri minimize ederek ideal endüstriyel çözümler geliştirmeyi hedeflemektedir [9]. İplik türü, renklendirme ve yardımcı kimyasalların yapısal kalitesi, yumuşak sarım matrisinin homojenliği ve boya koniğinin geometrik karakteristikleri, iplik boyama sistemlerinde mukavemet ve renk verimliliğini belirleyen temel parametrelerdir [2,9]. Bu doğrultuda, çağdaş tekstil terbiye işlemlerinin odak noktasını, mamul kalitesinin korunması ve ekolojik duyarlılık kavramları oluşturmaktadır [10,11].

Bu çalışmada; makro düzeydeki endüstriyel boyama performansları ile mikro düzeydeki lif yapıları arasındaki doğrusal etkileşimleri ortaya koymak adına; farklı elyaf kompozisyonlarına sahip Ne 20/1 kesikli (stapel) selülozik ipliklerin boyama performansları ve referans bir renk standardına olan afiniteleri, spektrofotometrik analizler ve supramoleküler lif morfolojileri üzerinden sistematik olarak incelenmiştir. Deneysel tasarım kapsamında; kullanılacak boyarmadde tipi, flotte banyosu, reçete ve işletme parametreleri sabit tutularak elyaf türü temel değişken olarak belirlenmiştir. Ayrıca, sargı geometrisini standartlaştırmak ve sirkülasyon mekanizmasını optimize etmek amacıyla, ipliklerin sarıldığı boya masuraların yararlı yüzey katsayısı tüm

numunelerde 0.45, sarım yoğunlukları ise birbirine eşit tutulmuştur. Bu standardizasyon doğrultusunda, farklı selülozik liflerin izotermal ve eşdeğer flotte koşulları altında sergiledikleri boyanma performansları ve CIE Lab* renk uzayındaki parametrik değişimleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

Deneysel tasarım kapsamında, supramoleküler lif morfolojisinin boyama performansına etkisini incelemek amacıyla farklı elyaf kompozisyonlarına sahip beş farklı iplik numunesi seçilmiştir. Bu doğrultuda, çalışmada hammadde değişkeni olarak %100 keten, %100 pamuk, %100 viskon, %100 Tencel ve %50/%50 oranında harmanlanmış 2/50 Ne pamuk-keten karışımı iplikler kullanılmıştır. Sistematik bir karşılaştırma yapabilmek adına, tüm iplik numunelerinin doğrusal yoğunlukları Ne 20/1 olarak sabitlenmiştir. %100 pamuk elyafı; saf selülozik yapısı sayesinde standart bir boyarmadde tutumu sergilemesi, karmaşık lif etkileşimlerinden uzak olması ve karışım ipliklerdeki renk değişimlerinin net biçimde ölçülmesine imkân tanıyan temel bir kıyaslama zemini oluşturması nedeniyle "referans numune" olarak tayin edilmiştir. Böylece %100 pamuktan üretilen Ne 20/1 iplik, boyama performansı ile renk parametrelerinin değerlendirilmesinde kontrol grubu olarak kullanılmıştır.

Flotte sirkülasyon mekanizmasını ve sargı geometrisini standartlaştırmak amacıyla, tüm iplikler 2019 model TWX-W tipi SSM yumuşak sarım makinesinde, eşdeğer devir, gerginlik ve bobin metrajı parametreleri altında bobin formuna getirilmiştir. Sarım işleminde kullanılan delikli boya masuralarının yararlı yüzey katsayıları tüm numunelerde 0.45 olarak birbirine eşit tutulmuştur. Bu standardizasyon sayesinde, sargı matrisi genelinde oluşabilecek yoğunluk varyasyonları minimuma indirilmiştir; nitekim ölçülen sarım yoğunluğu değerleri arasındaki maksimum farkın %0,805 gibi oldukça sınırlı bir düzeyde kaldığı tespit edilmiş ve bu değerler Tablo 2'de detaylandırılmıştır.

Yumuşak sarım prosesi tamamlanan numune bobinleri, sargı yoğunluğundan kaynaklanabilecek deneysel hataları elimine etmek adına tek bir boya kazanı içerisinde, eşdeğer flotte koşullarında ve izotermal bir rejim altında optik beyaz tonunda boyanmıştır. İşlem esnasında reaktif boyarmaddeler, yardımcı kimyasallar ve banyo sıcaklık eğrileri (rejimleri) tüm numuneler için tamamen sabit tutulmuş; boyama reçetesinde yer alan kimyasal bileşenler, kazan hacim ve kg miktarları ve tüm konsantrasyon değerleri ise Tablo 1'de sunulmuştur. Boyama ve ardından gerçekleştirilen kurutma proseslerinin tamamlanmasını müteakip, numuneler tekrar sarım sisteminden geçirilerek sonraki aşamalar için kullanıma hazır hale getirilmiştir. Elde edilen mamullerin endüstriyel renklendirme performansları, makro düzeydeki renk verimlilikleri ve spektral yansıma değerleri, Macbeth Color-Eye® 7000 spektrofotometre cihazı kullanılarak sistematik olarak analiz edilmiştir.

Tablo 2. Boya reçetesi çalışma verileri

BOBİN SAYISI:	5					
İPLİK NO:	Ne 20/1 Pamuk/Keten/Viskon/Tencel/ 2/50 Pamuk-Keten					
BANYO HACMİ (lt):	15	<table><tr><td>BOY. MİKTARI VE RENK (kg):</td><td>5,00 –Optik Beyaz</td></tr></table>			BOY. MİKTARI VE RENK (kg):	5,00 –Optik Beyaz
BOY. MİKTARI VE RENK (kg):	5,00 –Optik Beyaz					
ÖN İŞLEM						
TEKOVET DV	529020		1,25	18,75		
KOSTİK	300124		2,00	30		
HİDROJENPEROKSİT	240913-01		2,00	30		
ENBRİTE CMA	2405	0,0000%		0		
ASETİK ASİT	202301-003		0,50	7,5		
ANTİPER R	209271909		0,35	5,25		
BOYARMADDELER						
KROMOFIX YELLOW MEG H/C		0,17%		8,28		
KROMOFIX RED MER H/C		0,23%		11,45		
KROMOFIX BLUE HLF		0,0014%		0,07		
YARDIMCI KİMYASALLAR						
DENAGAL 212 NEW	194220303		0,50	7,5		
TEKOQUEST IT-C	529020		0,50	7,5		
TUZ VE SODA (BERABER VERİLECEK)						
TUZ	1015101019		20,00	300		
SODA	207-838-8		10,00	150		
SON İŞLEMLER / YIKAMA						
KOSTİK	300124		0,00	0		
ASETİK ASİT	202301-003		1,00	15		
TEKOWASH NEU	526011		0,00	0		
DNGSOFT N	207830109	3,00%		150		
TEKOFIX SEF	529020	1,00%		50		

Tablo 2. Kullanılan materyallerin yumuşak sarım makinesinde çalışma verileri

Ne Cinsi	D Çap (Mm)	d Çap (Mm)	Yüzey Katsayısı	Bobin Uzunlu k (m)	Gram (g)	Yükseklik (mm)	Gerginlik (cN)	Devir (Dev/D k)	Yoğunluk (g/Dm ³)	Renk Onayı İçin ΔE (NBS)
20/1 Keten	168	65	0,45	33860	1003	145	20	1000	3.671.724	ΔE<0,5
20/1 Pamuk	169	65	0,45	33860	1014	145	20	1000	366.059	ΔE<0,5
20/1 Viskon	167	65	0,45	33860	993	145	20	1000	3.686.578	ΔE<0,5
20/1 Tencel	168	65	0,45	33860	1000	145	20	1000	3.660.742	ΔE<0,5
20/1 2/50 Pamuk-Keten	167	65	0,45	33860	985	145	20	1000	3.656.877	ΔE<0,5

Bobin boyama prosesinin verimliliği ve nihai renk kalitesi; boya masuralarının geometrik ve yüzey karakteristikleri, sargı matrisinin homojenliği, ipliğin yapısal özellikleri ve boyarmaddenin kimyasal kalitesinin yanı sıra; flotte sirkülasyon hızı, yönü, pompalama basıncı ve boyama makinesinin teknik konfigürasyonları gibi proses parametreleri tarafından belirlenmektedir [12].

2.1. Bobin Boyama Prosesinde Perforasyonlu Masura Geometrisi Ve Malzeme Özelliklerinin Rolü

2.1.1. Masuraların Fonksiyonel Önemi

Paket (bobin) boyama işlemlerinde proses verimliliği ve nihai renk kalitesini belirleyen en temel makro etken, taşıyıcı eleman olarak kullanılan boya masuralarının yapısal ve geometrik karakteristikleridir [13]. İplik boyama prosesinin optimize edilebilmesi, tekstil yardımcı malzemesi sınıfında yer alan bu masuraların yapısal kalitesi ile doğrudan ilişkilidir [13]. Gerek ring gerekse open-end (açık-uç) iplikçilik sistemlerinde bobinleme aşamasında kullanılan konik veya silindirik formdaki masuralar, yalnızca birer taşıyıcı eleman olmayıp; sargı matrisinin kalitesini, geometrik sarım açısını ve ipliğin ardışık proseslerdeki sağılma (çözülme) performansını doğrudan belirleyen fonksiyonel mühendislik ürünleridir [14]. Boyama esnasında ise bu masuralar, likör sirkülasyonu sırasında oluşan içten-dışa (in-to-out) ve dıştan-içe (out-to-in) basınç gradyanlarının ideal seviyede dengelenmesini sağlayarak, bu basınç farklarından kaynaklanan abraj (renk düzgünsüzlüğü) problemlerinin önüne geçen kritik bir ara yüzey görevi üstlenmektedir [14].

2.1.2. Delikli Boya Masuralarında Aranması Gereken Teknik ve Yapısal Kriterler

Bobin boyamaya hazırlık evresinde tercih edilen perforasyonlu (delikli) masuralar; üretim malzemesi, geometrik tasarım, boyutsal toleranslar, yüzey morfolojisi, delik çapı, delik formu/dağılımı ve mekanik esneklik gibi çok sayıda parametreye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [15]. Bu mikser yapısal özellikler, sarılacak ipliğin lif türüne ve viskoelastik davranışına bağlı olarak optimize edilmektedir[16]. Dolayısıyla, homojen bir flotte dağılımının elde edilmesi ve zorlu terbiye koşullarına uyum sağlanabilmesi adına, delikli boya masuralarının aşağıdaki teknik ve yapısal kriterleri karşılaması zorunludur [17].

Yüzey Uygunluğu ve Topografyası: İdeal bir boyama rejimi ve homojen sıvı penetrasyonu için masura yüzey morfolojisinin iplik matrisiyle uyumlu olması gerekir [17].

Yüzey Temizliği ve Yapısal Bütünlük: Masura yüzeyleri; korozyon (pas), kimyasal kirlilik veya iplikte mekanik hasara (kesik, aşınma) yol açabilecek mikroskobik düzgünsüzlüklerden tamamen arındırılmış olmalıdır [17].

Mekanik Mukavemet: Masura, yumuşak sarım oluşumu esnasında ve yüksek basınçlı boyama prosesinde, uygulanan dış kuvvetlere karşı iplik sargı yoğunluğunu ve geometrik formunu koruyacak yüksek eğme/basma dayanımına sahip olmalıdır [18].

Termal ve Kimyasal Stabilité: Terbiye proseslerinde uygulanan yüksek sıcaklık (HT) ve agresif alkali/asidik kimyasal ortamlardan etkilenmeyerek boyutsal kararlılığını korumalı, deformasyona uğramamalıdır [18].

Ekolojik ve Toksikolojik Uygunluk: Üretim ve kullanım döngüsü boyunca insan sağlığını riske atmayacak ve çevresel sürdürülebilirlik kriterlerine uyum sağlayacak ham maddelerden eldesi şarttır [19].

Ekonomik Ömür: Endüstriyel sürdürülebilirlik adına masuraların aşınma direnci yüksek, uzun ömürlü ve maliyet etkin olması gerekmektedir [18,19].

2.1.3. Malzeme Teknolojisindeki Dönüşüm: Metalik Masuralardan Polimerik Alternatiflere

Geleneksel iplik terbiye işletmelerinde uzun yıllar boyunca krom kaplı veya paslanmaz çelik esaslı delikli boya masuraları ve yaylı sistemler yaygın olarak kullanılmıştır [20]. Ancak metalik masuraların agresif işletme şartlarında (yüksek sıcaklık, asidik/alkali banyolar) zamanla deforme olması, bobinaj (sarım) makinelerinin tambur yüzeylerinde tribolojik (sürtünmeye bağlı) aşınmalara yol açması ve yüksek yatırım/bakım maliyet indeksine sahip olması, alternatif malzeme arayışlarını hızlandırmıştır [21].

Kimya ve polimer teknolojisindeki güncel gelişmeler doğrultusunda, metalik malzemelerin mekanik ve termal mukavemet değerlerine yakın performans sunabilen yeni nesil mühendislik polimerleri sentezlenmiştir [22,23]. Bu gelişmiş polimerik moleküllerden üretilen delikli masuralar; düşük tedarik maliyetleri, hafif yapıları, korozyon dirençleri ve farklı boyama rejimlerine gösterdikleri yüksek adaptasyon kabiliyeti sayesinde geleneksel metal esaslı masuralara önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir [23].

2.1.4. Basınç Varyasyonları, Abraj Problemleri ve Endüstriyel Çözüm Önerileri

Modern gelişmelere rağmen, iplik boya rejimlerinde kullanılan perforasyonlu masuraların kronik dezavantajı, yüzey alanlarının yaklaşık %60'lık kısmının delikli geometriden oluşması nedeniyle, iç-dış sirkülasyon esnasında hidrolik basınç kayıplarına yol açması ve bu durumun boyama performansını sınırlandırmasıdır [24]. Özellikle sınırlı delik sayısına ve homojen olmayan sarım yoğunluğuna bağlı olarak, bobinin alt (taban) kısımlarında hidrolik akış direnci artmakta ve içten-dışa oluşan basınç gradyanı nedeniyle ciddi abraj (renk farklılığı) problemleri meydana gelmektedir. Endüstride bu renk düzgünsüzlüğü hatası, sonraki aşamalarda yaklaşık %2,5 ila %5 oranında kritik bir iplik telefne (atığına) sebebiyet vermektedir [24].

Söz konusu abraj riskini ve hidrolik basınç düzgünsüzlüklerini minimize etmek adına endüstriyel işletmeler farklı modifikasyonlara başvurmaktadır [25]:

a. **Filtrasyon Uygulamaları:** Yumuşak sarım esnasında, özellikle yüksek oranda çepel ve uçuntu içeren kirlilik düzeyi yüksek doğal liflerden (pamuk, keten vb.) üretilen ipliklerde, yoğunluk

farkından doğabilecek abrajı engellemek ve yabancı partiküllerin iplik matrisine penetrasyonunun önüne geçmek amacıyla masura yüzeyinde filtre kâğıtları kullanılmaktadır [25].

b. Koruyucu Tekstil Ara Yüzeyleri (Çorap/File): Sarım dibinde (masura yüzeyine yakın ilk katmanlarda) hidrolik dalgalanmalardan kaynaklanan abraj problemini yok etmek veya sirkülasyon akışını sönümleyerek homojenleştirmek amacıyla, masura delik yüzeylerine boyama öncesinde koruyucu elastik çorap veya fileler geçirilmektedir [25].

Sonuç olarak, bobin renklendirme prosesinde performans açısından en belirleyici parametreler; masura yüzeyindeki deliklerin geometrik tipi ve delik çapıdır. Masura üzerindeki efektif delikli alan oranı ne kadar geniş ve dağılımı ne kadar homojen ise, boyama rejimi o derece stabil ve yüksek verimlilikle gerçekleşmektedir. Bu durum, işletmelere hem zaman optimizasyonu hem de nihai ürün kalitesinde spektral kararlılık sağlamaktadır [24-25].

Literatürde ve endüstriyel tasarımlarda masura yapılarının bu etkinliğini sayısal olarak değerlendirebilmek adına "yararlı yüzey katsayısı" kavramı geliştirilmiştir. Bu katsayı, boya masurasının toplam projeksiyon yüzey alanının yüzde kaçının delikli (aktif

akışa izin veren) veya deliksiz olduğunu matematiksel olarak ortaya koyan en temel tasarım kriteridir.

Bir delikli boya masurasında yararlı yüzey katsayısı oranını belirlemek için kullanılan denklem (1) şu şekildedir [26];

$$Y_{yk} = Sg/SD \quad (1)$$

Burada;

Y_{yk} - Masuraların Yararlı Yüzey Katsayısı;

SD - Masuraların yüzündeki deliksiz yerlerin alanı

SG - Masuraların yüzündeki deliklerin toplam alanıdır.

Boya masuralarının yüzey yapısının % ile ifade etmek daha net sonuçlar verebilir. % ifadeye göre kullanılan denklem (2)'nin kullanılması uygundur.

$$\% Y_{yk} = 100 * \left(\frac{SG}{SD} \right) \quad (2)$$

Gruplara ayrılmış boya masuraların yararlı yüzey katsayısının değerleri Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3'te görüldüğü üzere boya masuralarının yararlı yüzey katsayısı 0,21-0,45 arasındadır.

Tablo 3. Boya masuralarının yararlı yüzey katsayı değerleri [26,27]

Masura Grupları	Masura Tipi	Yararlı Yüzey Katsayısı	Koniğin Yüzey Alanındaki Boşluk (%)
1	Pürüzsüz plastik silindirik masuralar	0,40-0,45	40-45
2	Dairesel kaburgalı plastik silindirik masuralar	0,25-0,35	25-35
3	Esnek masuralar	0,75-0,80	75-80
4	Uzun boyu kaburgalı plastik masuralar grubu	0,21-0,31	21-31

2.2. Bobin Boyamada İplik Sarım Parametrelerinin Ve Kolorimetrik Ölçüm Şartlarının Proses Performansına Etkisi

2.2.1. Sarım Mekanikliği, Yoğunluk Varyasyonları ve Proses Parametreleri

Bobin (paket) boyama işlemine tabi tutulacak ipliğin ham madde özellikleri ve hedeflenen sargı yoğunluğu esas alınarak bir sarım performans matrisi oluşturulmaktadır [27]. Bu doğrultuda, elyafın viskoelastik davranışına uygun kinematik devir ve gerginlik (tansiyon) parametreleri belirlenmekte; hedeflenen gözeneklilik değerlerine ulaşmak amacıyla hassas yumuşak sarım işlemi gerçekleştirilmektedir [28]. Söz konusu işlem, kontrollü gevşek sarım yapabilme kabiliyetine sahip özel bobinleme makinelerinde uygulanarak silindirik veya konik formda bobinlerin eldesiyle sonuçlanır [28]. Boyama prosesinin hidrolik streslerine mukavemet gösterebilecek paketlerin üretiminde ise mekanik dayanım, termal kararlılık ve esneklik özellikleri optimize edilmiş mühendislik polimerlerinden imal edilen plastik masuralar tercih edilmektedir [29].

Tekstil imalat zincirinde sarım işleminin dâhil olduğu tüm ara kademelerde, iplik sarım yoğunluğu nihai mamul kalitesini belirleyen en kritik parametrelerden biri olarak ön plana çıkmaktadır [30]. Sargı yoğunluğunu ve matris homojenliğini doğrudan etkileyen unsurlar; sarım elemanının fiziksel geometrisi, sarımı gerçekleştiren makine donanımlarının mekanik hassasiyeti ve sarım ortamının fiziksel iklimlendirme (sıcaklık ve bağıl nem) şartlarıdır[30]. Literatürde bir bobinin sarım yapısını ve dolayısıyla gözeneklilik dağılımını belirleyen temel parametreler; sarılma esnasında oluşan sarım açısı, silindirik tahrik balabanı üzerinde meydana gelen iplik adım sayısı, sarım gerginliği, sarılan ipliğin elyaf kompozisyonu ile iplik numarası ve pakedin sert veya yumuşak sarım tipi şeklinde sınıflandırılmaktadır [27-30].

2.2.2. Gerginlik Profilinin ve Makine Dinamiklerinin Sargı Yoğunluğuna Etkisi

İplik boyama işlemlerinde, boyama öncesi uygulanan yumuşak sarım yoğunluğu, flotte penetrasyonunun homojenliği açısından fonksiyonel bir öneme sahiptir. Homojen bir yoğunluk dağılımını

sağlayan ana etken ise sarım gerginlik profilinin dinamik kontrolüdür. Bobin yüzeyinde iplik morfolojisini ve sargı kararlılığını bozmayacak bir gerginlik gradyanının oluşturulması, kütleli yoğunluk dengesi açısından kritiktir [31]. İpliğin sonradan maruz kalacağı mekanik gerilimler ve kullanım alanları dikkate alındığında, sarım gerginliği bobinin ilk sarım noktasında (iç çaplarda) daha yüksek değerlerde seçilmektedir; bu durum masura çeperine yakın bölgelerde yüksek yoğunluklu bir matris oluşturur. Buna karşın, bobinin dış çaplarına yaklaşıldıkça, yani sarım miktarı tamamlanmaya yüz tuttukça, sargı gerginliği kademeli olarak düşürülmekte ve böylece dış katmanlarda daha düşük yoğunluklu, gevşek bir yapı elde edilmektedir [32].

İplik sarım yoğunluğunu etkileyen diğer mekanik faktörler; iplik masurasının tahrik silindiri (balaban) üzerinde oluşturduğu hareket ve baskı basıncı, sarım esnasında iplik rehberinin gerçekleştirdiği açıl hareket mesafesi (gezinme adımı) ve nominal makine devridir. Masura baskı basıncı mekanik veya pnömatik sistemlerle hassas olarak ayarlanabilirken, makine devrindeki artış iplik üzerindeki dinamik gerginliği doğrudan artırdığı için yoğunluk üzerinde birinci dereceden belirleyicidir. Yüksek makine devirlerinde çalışıldığında, sarım hızlarındaki merkezkaç kuvvetlerinin etkisiyle iplikler sargı matrisi içinde daha paralel bir yönelme ve yerleşim eğilimi göstermekte, bu durum inter-elyaf boşlukları daraltarak bobin yoğunluğunu artırmaktadır [33].

2.2.3. Farklı Elyaf Türlerinin Yapısal Davranışları ve Flotte Penetrasyon Performansı

Selülozik lifler yüksek nem absorpsiyonu ve şişme davranışı nedeniyle boyama sırasında önemli yapısal değişimler gösterir. Bu durum, özellikle paket boyamada likör penetrasyonunun lif içi difüzyonuna bağlı olarak homojenliği doğrudan etkilemektedir [34].

Bobin boyama prosesinde paket yoğunluğu ve sarım gerginliği homojen değilse, boya likörü en düşük dirençli akış yollarını takip ederek renk düzgünsüzlüklerine neden olmaktadır [35].

Sarım parametreleri (gerginlik, hız, çapraz sarım açısı ve paket yoğunluğu) boyama performansını belirleyen temel faktörlerdir ve bu parametrelerin birlikte optimize edilmesi, renk varyasyonunu önemli ölçüde azaltmaktadır [36].

Buna karşın, farklı polimerik ve morfolojik yapıya sahip lifler boyama banyosunda tamamen farklı termomekanik davranışlar sergilemektedir:

Yün İplikleri: Protein esaslı yün iplikleri, nispeten daha yüksek sıkılıkta sarılabilmek morfolojisine sahiptir. Bu durum, yün liflerinin sulu ve sıcak ortamlarda sergilediği yüksek esneklik ve yayılma (kıvrım) kabiliyeti ile açıklanabilir; bu yapısal esneklik sayesinde boya çözeltisi, sargının içerisinden aşırı bir hidrolik dirençle karşılaşmadan homojen bir şekilde migrasyon yapabilmektedir.

Sentetik İplikler: Polyester ve poliamid gibi sentetik iplikler, ısı işlemleri altında yüksek termal çekme (büzülme) eğilimi

gösterirler. Bu performans daralmanın sargı matrisini sıkıştırarak flotte akışını engellememesi adına, sentetik iplikler ya boyama öncesinde ön çekme/fiksaj işlemlerine tabi tutularak boyamaya uygun hale getirilir ve yeniden sarılır; ya da çekme neticesinde silindirik boya masuralarının radyal yönde küçülmesini ve ipliğin aşırı sıkışmasını absorbe edebilen özel eksenel/elastik masuralara sarılarak boyama prosesine sevk edilir.

Bobin sarım yoğunluğundaki makro ve mikro düzeydeki heterojenlik, flotte penetrasyon performansını doğrudan sekteye uğratmaktadır. Sargı matrisi genelinde gevşek sarım sergileyen (alçak yoğunluklu) bölgeler düşük hidrolik direnç gösterdiğinden, flotte akış hatları bu alanlara doğru yönelecek ve likör bu kanallardan kontrolsüz bir şekilde (kısa devre yaparak) geçecektir. Bu durum, düşük akış alanlarında düzensiz ve yetersiz bir boyama morfolojisine neden olur. Aksine, yüksek sarım sıklığına sahip bölgelerde inter-elyaf ve inter-iplik boşluklarının daralması neticesinde banyo sirkülasyonu inhibe edilmekte ve kütle transferi engellenerek boyama homojenliği ortadan kalkmaktadır. Bu hidrolik anomalileri önlemek amacıyla, sargılar boyama aparatına yerleştirilmeden önce, çapraz bobinlerin alt ve üst kenar (omuz) kısımları mekanik olarak bastırılarak hafifçe kavislendirilir (radüsleme işlemi). Bu geometrik modifikasyon, boyama esnasında kenar akış hatlarındaki basınç kayıplarını engelleyerek boya penetrasyonunun tüm bobin kesitinde izotropik olmasını sağlar [34-36].

2.2.4. Spektrofotometrik Renk Ölçüm Bilimi ve CIE Sistemi Kuralları

Optimum sarım yoğunluğu ve homojen flotte sirkülasyonu ile boyanmış bir tekstil materyalinin renk algısının ve renk farklarının (CIELAB ΔE^*) spektrofotometrik olarak doğru bir biçimde değerlendirilmesinde, standardizasyon parametreleri kritik bir öneme sahiptir. Bir tekstil yüzeyinin renk algısı; numunenin maruz kaldığı aydınlatma koşullarına (standart aydınlatıcılar), numunenin fiziksel boyutlarına (gözlem açısı) ve materyalin arkasında yer alan fon (arka plan) rengi ile çevresel kontrast bileşenlerine doğrudan bağlıdır. Nesnenin optik ve görsel özellikleri deneysel olarak incelendiğinde ise; yüzey dokusu (morfolojik pürüzlülük), yüzeyin parlaklık/matlık seviyesi (spekter yansıma bileşenleri) ve malzemenin kendine özgü spektral yansıma karakteristikleri bir arada dikkate alınmalıdır [37].

Günümüzde, tekstil başta olmak üzere tüm endüstriyel görsel sektörlerde renk ölçümü, spesifikasyonu ve formülasyonu, CIE (Commission Internationale de l'Éclairage / Uluslararası Aydınlatma Komisyonu) sistemi üzerine inşa edilmiştir. İlk olarak 1931 yılında standart gözlemci verileriyle oluşturulan bu kolorimetrik sistem, temel fiziksel ve matematiksel prensiplerinden ödün vermeden, zaman içerisinde gelişen teknolojiye paralel olarak çeşitli matematiksel düzeltmeler (CIE 1976, CMC, CIEDE2000) ve standart aydınlatıcı eklemeleriyle güncellenmiştir. CIE yaklaşımı, soyut ve subjektif renk algı modellerinden ziyade, insan görsel sisteminin psikofiziksel

tepkilerini temel alan deneysel gözlemler ve enstrümantal ölçümler üzerine kuruludur [37].

CIE $L^*a^*b^*$ renk uzayı, renklerin insan algısına en yakın şekilde nesnel, tekrarlanabilir ve standart bir biçimde tanımlanabilmesi amacıyla günümüz endüstrisinde en yaygın kabul gören referans sistemdir ve modern renk yönetim sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Bu sistem, bir rengin aynı anda hem kırmızı hem yeşil ya da hem sarı hem mavi olamayacağı karşıt renk teorisi prensibine dayanır. Söz konusu temel varsayım, renk tonlarının üç boyutlu bir uzayda nicel olarak ifade edilebilmesi için doğrusal ve ölçülebilir parametrelerin kullanılmasına olanak tanır. Sistemde dikey eksen oluşturulan L^* değeri renk açıklığını (luminositi) temsil ederken; yatay eksendeki koordinatları belirleyen a^* değeri kırmızı-yeşil, b^* değeri ise sarı-mavi bileşenlerini göstermektedir. Bu koordinat yapısı, renk farklılıklarının hassas bir biçimde hesaplanmasını ve standartlaştırılmasını mümkün kılmaktadır [38].

ΔE^* , iki renk arasındaki farklılığın nicel olarak ifade edilmesinde kullanılan temel bir parametredir. Bu değer, CIE $L^*a^*b^*$ renk uzayında konumlanan iki rengin koordinatları arasındaki Öklidyen mesafe ile belirlenir. ΔE^* değeri arttıkça, görsel olarak algılanan renk farklılığı da artmaktadır [39]. Genel olarak denkle (3) şeklinde gösterilmektedir.

$$\Delta E = [\sqrt{((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)}] \quad (3)$$

CIE $L^*a^*b^*$ sistemine göre, iki renk arasındaki renk farkı aşağıdaki matematiksel ifade ile tanımlanır ve bu yaklaşım CIE'nin standart kolorimetrik uzay tanımına dayanmaktadır [40].

Bu formülde, ΔL^* değerleri ışıklılık (luminositi) farkını, Δa^* değerleri kırmızı-yeşil bileşenindeki farklılığı ve Δb^* değerleri sarı-mavi bileşenindeki farklılığı temsil etmektedir. Bu üç bileşen, renk uzayında Öklidyen mesafe yaklaşımı ile toplam renk farkının hesaplanmasına olanak sağlar [40].

Formülün açılımı;

- Referans rengin koordinatsal durumu= $L1, a1, b1$
- Numune rengin koordinatsal durumu= $L2, a2, b2$ şeklinde olup iki fonksiyonel durum arasındaki farkı gösteren denklem ise aşağıdaki denklem (4)'te görülmektedir [41].

$$(\Delta E)^2 = (L1-L2)^2 + (a1-a2)^2 + (b1-b2)^2 \quad (4)$$

Firma talebi ile oluşturulan $\Delta E < 0,5$ NBS ise teste tabii tuttuğumuz renklerin birbiri ile uyumu olumlu olup, makinenin onayı 'GEÇER' demektir. Tablo 4'te ΔE 'ye göre renk farkı değerini gösteren durum verilmektedir [41].

Tablo 4. Renk Uzaklıkları (ΔE) Değerleri

ΔE	Birim	Renk Farkı
0	NBS	Yok
0,1	NBS	Çok Küçük
0,2	NBS	Küçük
0,3	NBS	Orta
0,4	NBS	Büyük
0,5	NBS	Çok Büyük

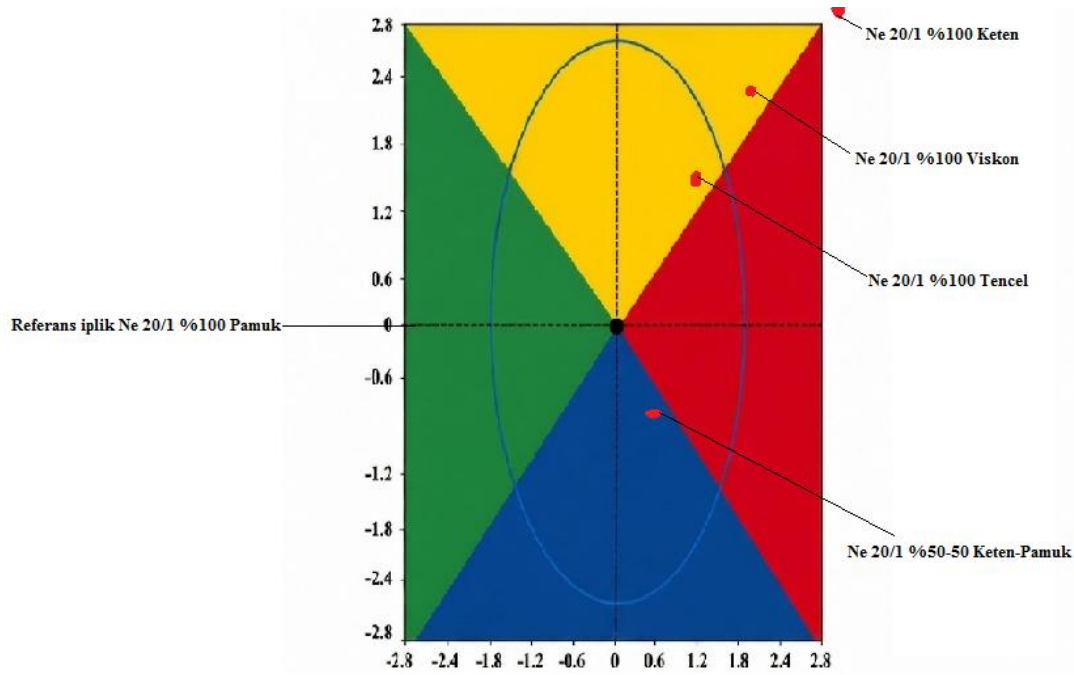
3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Farklı liflerden elde edilmiş olan aynı lineer yoğunluklu ipliklerin bobin yoğunlukları eşit olacak şekilde hazırlanan numuneleri, aynı boya rejiminde aynı anda boyama işlemine tabii tutulacaktır. Elde edilen numune boyanmış ürünlerin performansı, referans iplik olarak tayin edilen %100 pamuk Ne 20/1 ipliklerin boya durumuna göre belirlenmiştir.

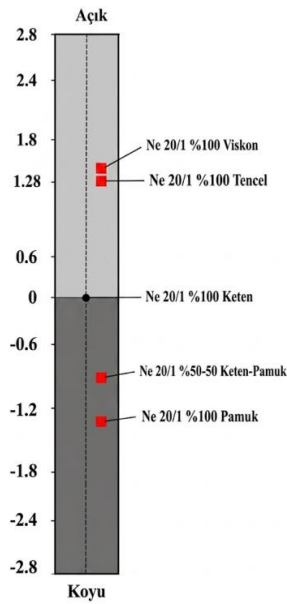
Referans ipliğe göre elde edilen sonuçlar genellikle tek tekrar sistemine göre yapılmaktadır. Test tekrar sayısı genellikle sınır değere eşit veya üst yakınlık durumuna göre tekrar edilebilir. Ancak yapılan iki farklı testte de $\Delta E \leq 0,5$ aralığının çok ötesinde olduğu için tekrar sayısı bir olarak kabul edilmiştir. Çalışmada elde edilen veriler tablo 5 ve şekil 1 ve şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 5. Numunelerin spektrometre değerleri

<u>Standart</u>	$L^*(NBS)$	$a^*(NBS)$	$b^*(NBS)$	$C^*(NBS)$	$h^*(NBS)$		
%100 Pamuk Ne 20/1 Referans	90,64	1,67	-11,8	11,95	278,02		
<u>Numune Adı</u>	DL^*	Da^*	Db^*	DC^*	DH^*	DE_{cmc}	$P/F DE_{cmc}$
Ne 20/1	-1,69 Daha Koyu	0,07 Daha Kırmızı	-1,11 Daha Mavi	1,11 Daha Parlak	-0,08 Daha Yeşil	1,05	KALDI
%50-50 Keten-Pamuk							
Ne 20/1 %100 Keten	-0,91 Daha Koyu	-0,67 Daha Yeşil	5,12 Daha Sarı	-5,16 Daha Mat	0,06 Daha Kırmızı	3,99	KALDI
Ne 20/1 %100 Viskon	1,24 Daha Açık	0,61 Daha Kırmızı	2,10 Daha Sarı	-1,95 Daha Mat	0,98 Daha Kırmızı	2,02	KALDI
Ne 20/1 %100 Tencel	0,84 Daha Açık	0,57 Daha Kırmızı	1,12 Daha Sarı	-1,01 Daha mat	0,75 Daha kırmızı	1,28	KALDI



Şekil 1. Spektrometre değerlerinin yeşil-kırmızı ve sarı-mavi grafiksel diyagramı



Şekil 2. Spektrometre değerlerinin açıklık-koyuluk grafiksel diyagramı

Şekil 1 ve şekil 2 matematiksel olarak hangi numune ipliğin referans ipliğe daha yakın performans sonuçları verdiğini gösteren diyagramlardır. Diyagramlar da görüldüğü gibi sarı-mavi, yeşil-kırmızı ve açıklık-koyuluk hattında hiçbir numune ipliğin referans ipliği yakaladığı görülmemektedir. Numune ipliklerin referans ipliklere göre istatistiksel olarak görünümünü gösteren durum ise tablo 6'da verilmektedir. Tekstil veya iplik alanındaki tüm verilerde, ISO veya AATCC standartlarında en yaygın kabul gören yöntem denklem (4)'te ki formülüdür ve üst sınır kabulü genelde $DE_{cmc} \leq 1,0$ olarak belirlenir [42,43].

Tablo 6'da sunulan "KALDI" ifadesi, spektrofotometre cihazının referans ipliğe ait CIE $L^*a^*b^*$ renk koordinatlarını temel alarak gerçekleştirdiği otomatik tolerans değerlendirmesini göstermektedir. Cihaz veri tabanındaki endüstriyel kabul sınırlarının aşıldığına işaret eden bu çıktıya rağmen; numunelerin hedef renge parametrik yakınlığı, toplam renk farkını ifade eden ΔE katsayıları üzerinden incelenmiştir. Renk ölçüm teorisinde ΔE değerinin sıfıra yaklaşması, referans renk ile numune arasındaki optik ve kimyasal uyumun maksimum düzeyde olduğunu doğrulamaktadır.

Tablo 6. Numunelerin ΔE_{cmc} Değerlerinin Standart Sapma ve Ortalamaya Göre Durumu

	ELYAF	Renk Durumu	ΔE
%50-%50	Pamuk-Keten	KALDI	1,05
%100	Keten	KALDI	3,99
%100	Viskon	KALDI	2,02
%100	Tencel	KALDI	1,28
ORTALAMA			2,085
STD SAPMA			1,33572

Elde edilen sayısal veriler analiz edildiğinde, referans renge en yüksek uyumu ve en düşük sapmayı %50-%50 Pamuk-Keten karışım ipliğinin ($\Delta E = 1,05$ NBS) sergilediği tespit edilmiştir. Bu numuneyi sırasıyla %100 Tencel ($\Delta E = 1,28$ NBS) ve %100 Viskon ($\Delta E = 2,02$ NBS) lifleri takip ederken; hedef renkten en çok uzaklaşan ve en yüksek renk varyasyonuna sahip olan numunenin ise %100 Keten ($\Delta E = 3,99$ NBS) iplik olduğu belirlenmiştir. Deneysel grubun ortalama renk farkı 2,085 olarak hesaplanırken, numuneler arasındaki davranışsal değişkenlik 1,33572 standart sapma değeri ile istatistiksel açıdan anlamlı bulunmuştur.

Farklı elyaf kompozisyonlarına sahip bu ipliklerin gösterdiği renk afinitesi varyasyonları; liflerin supramoleküler yapıları (kristalinite/amorf bölge oranları), şişme anizotropileri ve buna bağlı olarak boyarmadde erişilebilirlikleri ile doğrudan ilişkilidir:

- %50-%50 Pamuk-Keten Karışım İpliğinin Optimum Boyanma Performansı ($\Delta E=1,05$ NBS): Saf keten lifi, yüksek kristallik derecesi (%80-%90) ve yapısında barındırdığı hidroforik safsızlıklar (lignin, pektin ve bitkisel mukoza) nedeniyle boyarmadde difüzyonuna karşı ciddi bir direnç gösterir. Ancak iplik yapısına %50 oranında pamuk elyafının dâhil edilmesi, karışım ipliğinin toplam amorf bölge hacmini ve sulu çözeltilerdeki şişme kabiliyetini artırmıştır. Pamuk liflerinin yüksek boyarmadde ilgisi (afinitesi), ketenin yapısal boyanma dezavantajını kompanse ederek sistemin referans renge en yakın koordinatları yakalamasını sağlamıştır.
- %100 Tencel ve %100 Viskon Arasındaki Optik Davranış Farkı: Rejenere selülozik liflerin mikroyapı analizlerinde, konvansiyonel viskon liflerinin amorf bölge oranlarının (%60-%65), solvent eğirme prosesiyle üretilen lyocell (Tencel) liflerine kıyasla daha yüksek olduğu ve teorik olarak daha fazla boyarmadde absorbe ettiği bilinmektedir. Buna karşın, çalışmada %100 Tencel ipliğinin ($\Delta E=1,28$ NBS), %100 Viskon ipliğine ($\Delta E=2,02$ NBS) kıyasla referans renge daha yakın bir performans sergilemesi dikkat çekicidir. Bu durum, Tencel elyafının üretim metodolojisinden kaynaklanan yüksek oryantasyonlu fibriller yapısı, pürüzsüz yüzey morfolojisi ve dairesel kesit geometrisi ile açıklanabilir. Tencel'in bu yapısal düzenliliği, iplik yüzeyinden yansıyan ışığın daha homojen dağılmasını (speküler yansımayı) sağlamış, saçılma

kayıplarını minimize etmiş ve spektrofotometrik ölçümde renk düzgünlüğü algısını yukarı taşımıştır.

- %100 Keten İpliğinin Gösterdiği Maksimum Sapma ($\Delta E=3,99$ NBS): Saf keten numunesinin hedef değerden yüksek oranda sapma göstermesi, lif morfolojisinden kaynaklanan iki temel etkene dayanmaktadır. İlk olarak, lif eksenini boyunca yer alan yüksek kristallik derecesinin yarattığı sıkı paketlenmiş mikrofibriller yapı, boyarmadde anyonlarının lif merkezine difüzyonunu ve fiksajını performans olarak kısıtlamaktadır. İkinci olarak, kesikli (stapel) keten ipliklerinin yüzey pürüzlülüğü ve tüylülük indeksinin diğer selülozik liflere kıyasla daha yüksek olması, spektrofotometre ışığının iplik yüzeyinde düzensiz dağılmasına (difüz saçılmaya) yol açmıştır. Bu mikroyapısal düzensizlik, ΔE katsayısını matematiksel olarak yukarı taşıyarak boyama kalitesini olumsuz yönde etkilemiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı elyaf kompozisyonlarına sahip Ne 20/1 kesikli (stapel) selülozik ipliklerin boyama performansları ve referans bir renk standardına olan afiniteleri, spektrofotometrik analizler ve supramoleküler lif morfolojileri üzerinden sistematik olarak incelenmiştir. Elde edilen deneysel veriler ve teorik değerlendirmeler ışığında aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Selülozik liflerin mikroyapısal özellikleri, kristallik dereceleri ve amorf bölge oranları, boyama banyosundaki lif şişme davranışını ve boyarmadde erişilebilirliğini doğrudan belirleyen en kritik parametreler olarak öne çıkmaktadır. Lif yapısındaki amorf hacmin artışı boya penetrasyonunu kolaylaştırırken, yüksek kristallik ve yönelmiş (oryante) morfoloji difüzyon direncini artırmaktadır.
- Spektrofotometrik ölçüm sonuçlarına göre, referans renk tonuna en yakın koordinatları sergileyen ve optimum renk uyumu sunan numunenin %50-%50 Pamuk-Keten karışım ipliği ($\Delta E=1,05$ NBS) olduğu tespit edilmiştir. Saf keten elyafının yüksek kristalinite ve hidroforik safsızlıklardan kaynaklanan boyanma dezavantajının, iplik yapısına %50 oranında pamuk dâhil edilmesiyle başarılı bir şekilde kompanse edilebildiği görülmüştür. Bu durum, endüstriyel boyama proseslerinde keten içerikli ürünlerin renk

doğruluğunu artırmak adına harmanlama (karışım) stratejisinin etkinliğini doğrulamaktadır.

- Rejenere selülozik lifler grubunda yer alan %100 Tencel ipliğinin ($\Delta E=1,28$ NBS) daha yüksek amorf bölge hacmine sahip olan %100 Viskon ipliğine ($\Delta E=2,02$ NBS) kıyasla referans renge daha yakın bir optik performans sergilemesi çalışmanın dikkat çekici bulgularından biridir. Bu durum, Tencel elyafının solvent eğirme prosesinden kaynaklanan dairesel kesit geometrisi ve pürüzsüz yüzey morfolojisinin, iplik yüzeyindeki ışık yansımalarını standartlaştırarak renk düzgünlüğü algısını pozitif yönde etkilediğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla, nihai renk kalitesinde liflerin sadece kimyasal afinitelerinin değil, yüzey morfolojilerinin ve optik yansıma karakteristiğinin de belirleyici olduğu anlaşılmıştır.
- Çalışma kapsamında referans renkten en yüksek sapmayı ve en düşük renk uyumunu %100 Keten ipliği ($\Delta E=3,99$ NBS) göstermiştir. Ketenin yapısında yer alan sıkı paketlenmiş makromoleküler kristal yapının yarattığı kinetik bariyer ve kesikli keten ipliklerinin yüksek yüzey pürüzlülüğü/tüylülük indeksi, ışığın difüz saçılmasına yol açarak ΔE değerini matematiksel olarak yukarı taşımıştır.

Analiz edilen tüm iplik türlerinin spektrofotometrik olarak endüstriyel kabul sınırlarının dışında kalması ("KALDI" çıktısı), selülozik iplik boyama proseslerinde elyaf türüne özgü çok özel sarım gerginliği (tansiyon), banyo reçetesi ve fiksaj optimizasyonlarının yapılmasının mutlak bir gereklilik olduğunu göstermektedir. Bu araştırma, rejenere ve doğal selülozik liflerin mikroyapısal dinamikleri ile makro düzeydeki optik renk algısı arasındaki doğrusal ilişkiyi net bir şekilde ortaya koyarak, gelecekteki fonksiyonel iplik boyama ve renk yönetimi çalışmalarına teorik ve pratik bir zemin hazırlamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Wardman, R. H. (2017). An introduction to textile coloration: principles and practice. John Wiley & Sons.
2. Shore, J. (1995). Cellulosics dyeing, society of dyers and colourists. Bradford, England.
3. Lara, L., Cabral, I., & Cunha, J. (2022). Ecological approaches to textile dyeing: a review. Sustainability, 14(14), 8353.
4. Mahapatra, N. N. (2018). Textile dyeing. Woodhead Publishing India PVT. Limited.
5. de Oliveira, C. R. S., de Oliveira, P. V., de Aguiar, G. C. O., Missner, M. E. P., Tewo, R. K., da Silva Júnior, A. H., ... & de Aguiar, C. R. L. (2025). Dyes and dyeing of textiles: an overview of sustainability issues. Sustainable Coloration Techniques in Textiles, 1-54.
6. Choudhury, A. K. R. (2017). Principles of textile finishing. Woodhead Publishing.
7. Gulrajani, M. L. (Ed.). (2010). Colour measurement: principles, advances and industrial applications. Elsevier.
8. Chattopadhyay, D. P. (2011). Chemistry of dyeing. In Handbook of textile and industrial dyeing (pp. 150-183). Woodhead Publishing.
9. Broadbent, A. D. (2001). Basic principles of textile coloration (Vol. 132, pp. 332-357). Bradford, UK: Society of Dyers and Colorists.
10. Hasanbeigi, A., & Price, L. (2015). A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry. Journal of Cleaner Production, 95, 30-44.
11. Kant, R. (2012). Textile dyeing industry an environmental hazard. Natural science, 4(1), 22-26.
12. Broadbent, A. D. (2001). Basic principles of textile coloration (Vol. 132, pp. 332-357). Bradford, UK: Society of Dyers and Colorists.
13. Gong, R. H., & Wright, R. M. (2002). Fancy yarns: Their manufacture and application. Elsevier.
14. Karthik, T., & Murugan, R. (2016). Milkweed—A potential sustainable natural fibre crop. In Sustainable Fibres for Fashion Industry: Volume 2 (pp. 111-146). Singapore: Springer Singapore.
15. ISO 3914-7:1994. Textile machinery and accessories — Cylindrical tubes — Part 7: Dimensions, tolerances and designation of perforated tubes for cheese dyeing. ISO, 1994.
16. Özdemir H., Oğulata R. T.; Comparison of the Properties of a Cotton Package Made of Vortex (MVS) and Open-End Rotor Yarns. Fibres & Textiles in Eastern Europe 2011, Vol. 19, No. 1 (84) pp. 37-42.
17. Gündüz Gonca, Ş. (2023). The effect of dyeing tubes' structure on the colour difference of yarns. Industria Textila.
18. DesRosiers, V. J. (2000). U.S. Patent No. 6,032,890. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
19. Popescu, A. (2024). Enhancing Environmental Standards In Textiles: The Role of OEKO-TEX (r) Standard 100. Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Economic Sciences. Series V, 17(1), 59-68.
20. Schindler, W. D., & Hauser, P. J. (2004). Chemical finishing of textiles. Elsevier.
21. Bhushan, B. (2000). Modern tribology handbook, two volume set. CRC press.
22. Albrecht, K., Osswald, T., Baur, E., Meier, T., Wartzack, S., & Müssig, J. (2018). Fibre length reduction in natural fibre-reinforced polymers during compounding and injection moulding—experiments versus numerical prediction of fibre breakage. Journal of Composites Science, 2(2), 20.
23. Vatan, C. (2002). Plastik Malzemenin Geri Dönüşümü: Otomotiv Endüstrisinden Örnekler.
24. Scharf, S., Cleve, E., Bach, E., Schollmeyer, E., & Naderwitz, P. (2002). Three-dimensional flow calculation in a textile dyeing process. Textile research journal, 72(9), 783-788.
25. Mahmudova, N., Bobin boyama kalitesinin iyileştirilmesi ve iplik teleflerinin azaltılması üzerine bir araştırma, In: Journal of Awareness, 2018, 3, 777–786

26. R. Fettahov, V. Kaplan, R. Keskin ve G. Şimşek, “Terbiye ve Boyama Amaçlı Patronlar Üzerine Bir Araştırma”. Tekstil Maraton, Eylül- Ekim 5, 18-22, 2005.
27. Tomruk, E. (2008). Boyamaya hazırlanan bobinlerin sarım yapısının incelenmesi (Master's thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
28. Lawrence, C. A. (2003). Fundamentals of spun yarn technology. Crc Press.
29. Ehrenstein, G. W. (2012). Polymeric materials: structure, properties, applications. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
30. Klein, W. (1998). The technology of short-staple spinning.
31. Adanur, S. (2001). Handbook of Weaving. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
32. Yang, Y., & Mattison, V. L. (1997). The Effect of Package Density Profile on Level ness of Package Dyed Yarn. Textile Chemist & Colorist, 29(8).
33. Tuan, D. A., Trung, T. D., & Huong, C. D. (2024). Effect of technological winding parameters on yarn package density.
34. Wong, C. L., Wang, S., Karimnejad, S., Wijburg, M. G., Mansouri, H., & Darhuber, A. A. (2023). Transient deformation and swelling of paper by aqueous co-solvent solutions. Soft Matter, 19(6), 1202-1211.
35. Schmeißer, A., Bell, E. G., Gramsch, S., & Heidenreich, R. (2023). Simulation-based setting suggestions for yarn winding units to reduce color variation in knitted fabric. Textile Research Journal, 93(11-12), 2604-2619.
36. Schmeißer, A., Bell, E. G., Gramsch, S., & Heidenreich, R. (2023). Simulation-based setting suggestions for yarn winding units to reduce color variation in knitted fabric. Textile Research Journal, 93(11-12), 2604-2619.
37. CIE (Commission Internationale de l'Éclairage). (2021). Colorimetry, 4th Edition (CIE 015:2018, updated implementation guidance). Vienna: CIE Central Bureau.
38. Shange, S. F. (2021). Development of CIELAB colour system for colorimetric detection of heavy metals in wastewater using metal nanoparticles (Doctoral dissertation).
39. Xu, H. (2021). Studies of practical daylight simulators for industrial colour quality control. University of Derby (United Kingdom).
40. Masaoka, K. (2021). Proper application of chromaticity gamut area metrics for displays. Optics Express, 29(18), 29107-29115.
41. Green, P. (2023). Colorimetry and colour difference. Fundamentals and applications of colour engineering, 27-52.
42. International Organization for Standardization. (2019). Textiles — Tests for colour fastness — Part J03: Calculation of colour differences (ISO Standard No. 105-J03:2019).
43. American Association of Textile Chemists and Colorists. (2021). AATCC EP6: Instrumental Color Measurement. AATCC Technical Manual.