

PAMUK ELYAFININ GERİ DÖNÜŞÜMÜ: OPEN-END EĞİRME İLE SÜRDÜRÜLEBİLİR HAV İPLİĞİ ÜRETİMİ

Neslihan OKYAY^{1*}
Fatih IŞIK¹
Zehra KÜPE¹

¹Karacasu Tekstil, AR&GE Merkezi, Dulkadiroğlu, Kahramanmaraş, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 25.09.2025

Kabul Tarihi / Accepted: 02.03.2026

ÖZ: Tekstil endüstrisinde pamuk lifi potansiyel bir hammadde kaynağı olmasına rağmen, her yıl binlerce ton atık, lif uzunluğu dağılımı, incelik ve mukavemet özelliklerindeki heterojen yapı nedeniyle doğrudan yüksek kaliteli iplik üretiminde kullanılmamaktadır. Bu çalışmada, söz konusu atık elyafın open-end rotor eğirme teknolojisi kullanılarak hacimli hav ipliğine dönüştürülmesi üzerine kapsamlı bir proses optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, Ne 16/1 %10-50 arasında geri dönüştürülmüş pamuk karışımları kullanılarak elyaf hazırlama aşamasında açma- temizleme yoğunluğu, besleme hızı ve rotor devri gibi kritik parametreler sistematik olarak optimize edilmiş; elde edilen iplikler, düzgünlük (%CVm), ince-kalın yer ve neps içeriği (IPI/km), tüylülük indeksi (H%), kopma mukavemeti (Rkm) ve kopma uzaması (%) gibi kritik performans parametreleri açısından Ne 16/1 %100 pamuk ipliği ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bulgular, belirlenen optimum parametre kombinasyonlarında geri dönüştürülmüş elyafın, mukavemet ve yüzey karakteristikleri bakımından endüstriyel kullanım standardını karşılayabildiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, atık yönetiminde döngüsel ekonomi ilkelerini destekleyerek ekonomik ve çevresel faydanın yanı sıra sürdürülebilir bir üretim modeli sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Geri Dönüştürülmüş Pamuk; Open-end Rotor Eğirme Teknolojisi; Proses Optimizasyonu

RECYCLING OF COTTON FIBER: SUSTAINABLE PILE YARN PRODUCTION WITH OPEN-END SPINNING

ABSTRACT: Although cotton fiber is a potential raw material source in the textile industry, thousands of tons of waste cannot be directly used for high-quality yarn production each year due to the heterogeneous nature of fiber length distribution, fineness, and strength properties. In this study, a comprehensive process optimization was carried out to convert such waste fibers into bulky pile yarn using open-end rotor spinning technology. Within the scope of the study, Ne 16/1 yarns containing 10–50% recycled cotton blends were produced, and critical parameters such as opening–cleaning intensity, feed rate, and rotor speed were systematically optimized during the fiber preparation stage. The resulting yarns were comparatively analyzed against Ne 16/1 100% cotton yarn in terms of key performance parameters, including unevenness (%CVm), thin-thick places and neps content (IPI/km), hairiness index (H%), breaking strength (Rkm), and elongation at break (%). The findings revealed that under the identified optimum parameter combinations, recycled fibers can meet industrial usage standards in terms of strength and surface characteristics. These results support the principles of circular economy in waste management, offering not only economic and environmental benefits but also a sustainable production model.

Keywords: Recycled Cotton; Open-End Rotor Spinning Technology; Process Optimization

*Sorumlu Yazarlar/Corresponding Authors: nes@karacasutekstil.com.tr

DOI: <https://doi.org/10.7216/tekmuh.1790542>

www.tekstilvemuhendis.org.tr

1. GİRİŞ

Tekstil endüstrisi, küresel ölçekte ekonomik ve sosyal açıdan önemli bir sektör olmasına rağmen, üretim süreçlerinde yoğun kaynak tüketimi ve çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilirlik açısından sorunlar barındırmaktadır. Özellikle pamuk ve pamuk karışımli ürünlerin üretimi sırasında yüksek su ve tarım alanı gereksinimi, iklim değişikliği ve biyolojik çeşitlilik kayıpları gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Hammadde hazırlama, iplik eğirme, boyama ve bitim işlemleri sırasında oluşan lif atıkları ve iplik üstüğü atıkları gibi katı atıklar, tekstil fabrikalarında önemli miktarlarda birikmekte ve uygun şekilde yönetilmediğinde çevresel yük oluşturmaktadır. Bu nedenle, sınırlı kaynakların etkin kullanımı ve atıkların geri dönüşümü hem üretim verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir gereklilik haline gelmektedir [1].

Pamuk ve sentetik elyaf üretimi, yalnızca hammadde temini açısından değil, aynı zamanda üretim maliyetleri ve çevresel etkiler açısından da büyük önem taşımaktadır. Üretim sırasında yüksek miktarda enerji, su ve kimyasal tüketimi söz konusudur. Bu durum, artan maliyet baskısı ve çevresel düzenlemeler nedeniyle tekstil üreticilerini geri dönüşümlü liflerin kullanımına yönlentmektedir. Pamuk liflerinin geri dönüşümü hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamakta hem de üretim maliyetlerini düşürmektedir [2].

Tekstil atıkları katı, sıvı veya gaz atıklar olarak sınıflandırılır. Burada katı atıklar, elyaf, iplik, kumaş, karton, plastik vb. gibi temel tekstil atıklarını ifade ederken, sıvı atıklar, terbiye işlemleri sırasında oluşan atık su içeren boya ve kimyasallardır. Tüm tekstil işlemlerinden sonra açığa çıkan gaz atıklar ise birçok farklı maddeden oluşur ve emisyonla neden olur. İplik üretim sürecinde oluşan atıklar, yumuşak atıklar ve sert atıklar olarak sınıflandırılabilir. Şerit, vatka parçaları, fitil uçları ve pnömafıl atıkları gibi yeniden kullanılabilir atıklar genellikle yumuşak atık olarak kabul edilirken, ring makinesi ve bobinleme bölümünden elde edilen iplik atıkları doğrudan herhangi bir işlem yapılmadan kullanılamaz. Bu atıklar uygun ön işlemler (açma, temizleme) sonrası kullanılabilir. Bu nedenle sert atık olarak adlandırılır. Yapılan çalışmalarda, %30–50 oranında pamuk sert atığı içeren ipliklerin mukavemet kaybının tolere edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir [3].

Geri dönüşümlü iplik üretiminde mühendislik perspektifi, yalnızca hammadde kullanımını optimize etmekle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda iplik eğirme sürecinin parametrelerinin iyileştirilmesini de kapsamaktadır. Tarak telefi oranları, şapka parametreleri, bıçak mesafeleri ve tarak ayarları, iplikte oluşabilecek neps etkilerini minimize ederek ürün kalitesini doğrudan etkiler. Ayrıca, farklı numara ipliklerin karışım oranları ve iplik eğirme hızı, kumaşın mekanik dayanımı, esnekliği ve boncuklanma performansını belirleyen önemli faktörlerdir. Bu bağlamda, geri dönüştürülmüş pamuk lifleri kullanılarak üretilen ipliklerin mekanik ve yüzey özelliklerinin incelenmesi hem kalite

güvence hem de üretim optimizasyonu açısından kritik bir mühendislik analizidir [3].

Geri dönüştürülmüş elyaf içeren ipliklerin mekanik özellikleri, kullanılan karışım oranı ve iplik numarasına göre değişmektedir. İnce numara ipliklerde mukavemet kaybı daha belirgin olurken, kalın numara ipliklerde geri dönüştürülmüş liflerin kullanımı daha avantajlıdır. Ayrıca ipliklerde tüylülük ve kopma mukavemeti, geri dönüştürülmüş elyaf oranına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu durum, endüstriyel ölçekte kullanılabilirlik için parametrelerin dikkatli şekilde optimize edilmesini gerekli kılmaktadır [4].

Tekstil katı atıklarının geri kazanımı, yalnızca iplik üretimiyle sınırlı kalmayıp, kumaş üretiminden bitim işlemlerine kadar olan süreçlerin sürdürülebilirliğine de katkı sağlamaktadır. Katı atıkların uygun sınıflandırılması, post-tüketim pamuk liflerinin yeniden kullanımını mümkün kılar. Bu durum hem atık miktarının azaltılmasına hem de ürün maliyetlerinin optimize edilmesine olanak tanır. Ayrıca, iplik ve kumaş üretiminde kullanılan geri dönüştürülmüş liflerin standartlaştırılmış kalite testlerinden geçirilmesi, endüstriyel ölçekte uygulanabilirlik açısından önem arz etmektedir [5].

Pamuk tarladan giysi haline gelene kadar çok yüksek miktarda su, enerji ve kimyasal tüketmektedir. Bir kilogram pamuk lifi üretimi için yaklaşık 10.000–20.000 litre su kullanıldığı bildirilmektedir. Ayrıca iplik eğirme, dokuma ve örme işlemleri sırasında enerji tüketimi, bitim ve boyama işlemlerinde ise kimyasal ve su tüketimi yoğun olarak gerçekleşmektedir [6]. Tekstil sektörü, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumlu olup, özellikle boyama ve bitim proseslerinde su kirliliğine büyük ölçüde sebep olmaktadır [7].

Textile Exchange Materials Market Report (2025) raporuna göre, küresel elyaf üretimi 2024 yılında 132 milyon tona ulaşmıştır. Bu üretimin yaklaşık %59'unu polyester lifi oluştururken, pamuğun payı %19 düzeyindedir. Geri dönüştürülmüş elyafların toplam üretimdeki payı ise %7,6 seviyesindedir. Bu durum, tekstil endüstrisinin halen büyük ölçüde “virgin” (birincil) hammaddeye dayalı olduğunu, ancak geri dönüşüm bazlı liflerin yükselen bir trend haline geldiğini göstermektedir [8].

Atık pamuk liflerinin geri dönüşümü ve OE-rotor iplik üretimine yönelik çalışmalarda, farklı karışım oranları ve makine parametrelerinin iplik kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Taher ve ark. (2009) çalışmasında, pamuk atıklarının farklı oranlarda (%0, 12.5, 25, 37.5, 50, 62.5, 75 ve 100) OE-rotor iplik üretiminde kullanılmasının ve üretim parametrelerinin (rotor tipi, açma silindiri hızı, rotor hızı, büküm faktörü) iplik özellikleri üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Sonuçta, kullanılan telef oranı, iplik numarası ve rotor parametrelerinin iplik özelliklerini belirgin şekilde etkilediği bulunmuştur. %25'e kadar atık kullanımının, iplik kalite özelliklerinde değişiklik yaratmadığı, ancak atık oranı arttıkça tüylülük ve hata değerlerinin olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir[9]. Hasani ve ark. (2010), geri dönüştürülmüş pamuk telefini ham pamukla %35, %50 ve %65 oranlarında karıştırarak

Ne 12/1, 16/1 ve 20/1 iplik numaralarında Taguchi yöntemiyle optimizasyon yapmış; rotor çapı, rotor hızı, düze tipi, açma silindiri hızı ve iplik numarasının kaliteyi belirleyen temel faktörler olduğunu göstermiştir. Karışım oranına bağlı olarak etkili parametrelerin değiştiği, düşük telef oranında rotor çapının, eşit karışımında iplik numarasının; yüksek telef oranında ise iplik numarası, rotor çapı, rotor tipi ve açıcı silindir hızının öne çıktığı belirtilmiştir[10]. Khan ve Rahman (2015) ise pnömofil telefonun %5–25 oranlarında kullanımının Ne 16/1 iplikte mukavemet ve kopma uzamasını artırmaya karşın düzgünlük ve kopuş sayısını olumsuz etkilediğini; optimum rotor hızının mukavemet için 85.000 dev/dak, minimum kopuş için ise 75.000 dev/dak olduğunu, açıcı silindir için en uygun hızın 8.500 dev/dak seviyesinde bulunduğunu bildirmiştir[11]. Khan ve ark. (2015) çalışması da karışım oranı(%17/83, %33/67 pamuk/telef), hammadde hazırlama yöntemi, rotor ve açıcı silindir hızlarının Ne 16/1 iplik performansına etkisini değerlendirmiş; karışım oranı ve rotor hızının en kritik parametreler olduğunu, düşük rotor hızlarının daha iyi mukavemet ve düzgünlük sağladığını, harman hallaçta yapılan karışımın daha homojen lif dağılımı sunduğunu ve yüksek açıcı silindir hızının kopma uzamasını olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur[12]. Literatürde pamuk sert atıklarının iplik üretiminde belirli oranlarda kullanılabilirliğini ve kumaş özelliklerinde önemli bir kayıp oluşturmadığı görülmüştür. Ancak geri dönüştürülmüş liflerin farklı numara ipliklerde performans karşılaştırmalarına ve havlu kumaş üzerinde etkilerine dair sınırlı sayıda güncel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma, pamuk ve geri dönüştürülmüş pamuk liflerinden üretilen ipliklerin, iplik kalite özellikleri ile bu ipliklerden üretilen havlu kumaşların su emme özelliklerini mühendislik bakış açısıyla analiz etmeyi hedeflemektedir. Çalışma kapsamında, farklı iplik numaraları ve karışım oranları kullanılarak üretilen ipliklerin ve kumaşların fiziksel ve mekanik performansları değerlendirilerek, geri dönüştürülmüş liflerin endüstriyel uygulamalardaki potansiyeli ortaya konulmuştur. Böylece, hem sürdürülebilir tekstil üretimi için teknik veri tabanının oluşturulmasına hem de iplik üretim süreçlerinin optimizasyonu için mühendislik tabanlı önerilerin geliştirilmesine katkıda bulunulması hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1 Kullanılan Hammaddeler ve Özellikleri

Bu çalışmada, pamuk ve geri dönüştürülmüş pamuk lifleri temel hammadde olarak kullanılmıştır. Kullanılan hammaddelerin özellikleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Kullanılan hammaddelerin özellikleri

Lif Türü	Lif Uzunluğu (mm)	Lif İnceliği (mikron)	Nem Oranı (%)
Pamuk	28-32	4,4	7-8
Geri Dönüşüm Pamuk	15-28	4,4	7-8

2.2. Üretim Prosesleri ve Parametreleri

Çalışma kapsamında yüksek emiciliğe sahip pamuk elyafı ve %10-50 arasında farklı karışım oranlarında pamuk elyaf atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş pamuk karıştırılarak Ne 16/1 numarada yumuşak, düşük tüylülüğe sahip open-end hav iplikleri geliştirilmiştir.

İplik üretiminde harman-hallaç hattında Rieter UNIFLOC A11, Argema, Trützschler SP-MF, Trützschler CL-P, Trützschler MX-U, Trützschler CL-C3, Trützschler TS-T5 ve Trützschler SP-DX makineleri kullanılmıştır. Hammadde karışımı, harman-hallaç dairesinde açılıp tekrar karıştırılarak tarak işlemine uygun hale getirilmiştir. Tarak işlemi TC-11 makinesinde gerçekleştirilmiş ve hammadde, paralelleştirilerek homojen bir şerit hâline getirilmiştir. Tarak sonrası şeritler, cer makinelerinde işlenmiş; I. pasajda Rieter RSB 40, II. pasajda Rieter RSD 45 makinelerinde lif uçlarındaki kancalar açılarak daha homojen ve uniform bir yapı sağlanmıştır. Cer işleminden çıkan şeritler, open-end eğirme işlemine yönlendirilmiş ve Saurer Autocoro-9 makinesinde rotor çapı, navel ve büküm katsayısı, iplik numarası ve hammadde karışımına bağlı olarak uygun çıkış hızları ile Ne 16/1 düz iplikler üretilmiştir. Son olarak, üretilen ipliklere, kullanılan hammadde karışımına göre %55–65 sıcaklıkta, ortalama 50–60 dakika süreyle basınç altında fiksaj işlemleri uygulanmıştır.

2.3. Deneysel Planı

Çalışmada, iplik numarası, karışım oranları ve büküm katsayısı değişkenleri sistematik olarak tasarlanarak deney planı hazırlanmış ve Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 3’de çalışmada elde edilen havlu kumaşlar ve özellikleri görülmektedir.

2.4. Test Metotları

İplik düzgünlük testleri TS 628 standardına göre Uster Tester 6 cihazı kullanılarak her bir iplik tipi için 6 adet bobinden 400 m/dk hız yapılmıştır. İpliklerin mukavemet testleri TS 245 EN ISO 2062 standardına göre Uster Tensojet 4 cihazı kullanılarak her bir iplik tipi için 6 adet bobinden 400 m/dk hız yapılmıştır. Her bir iplik numunesinden düzgünlük ve mukavemet testleri olmak üzere toplam 36 (6 adet bobin x 6 test) test yapılmıştır. Elde edilen iplikler için mukavemet, tüylülük ve düzgünlük sonuçları tablo ve grafik olarak sunulmuştur. Geri dönüştürülmüş pamuk oranının iplik özellikleri üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Bu ipliklerin kalite kontrol testleri yapıldıktan sonra %100 pamuk ipliğine düzgünlük ve mukavemet değerleri açısından en yakın olan karışımın iplikleri, havlu kumaşta hav ipliği olarak kullanılmıştır. %100 pamuk ve %80 pamuk- %20 geri dönüştürülmüş pamuk iplikleri hav ipliği olarak kullanılarak, 18 iplik/cm çözgü sıklığı ve 12 iplik/cm atkı sıklıklarında 2/1 ribs örgü tipiyle ham kumaş 430-480 gr/m² gramajlarda dokunmuştur. Dokunan kumaşlara ön yıkama, çözgü ipliklerinden haşıl sökme ve apre (istenilen enlerde kumaş stabilizasyonlarının) işlemleri uygulanmıştır. Mamul kumaş gramajı ise 480-610 gr/m² dir. Havlu kumaşın AATCC-199 standardına göre yapılan su emme kapasitesi testinde, 10x10 cm boyutlarındaki numunelerin kuru ağırlıkları tartıldıktan sonra 30 dakika saf su içerisinde tamamen

ıslanma gerçekleşene kadar bekletilmiştir. Çıkarılan kumaşların üzerindeki fazla su uzaklaştırıldıktan sonra kumaşların yaş ağırlıkları belirlenmiş, yaş ve kuru ağırlıklar arasındaki farkın kuru ağırlığa oranından su emme kapasiteleri belirlenmiştir. Havlu kumaşların su emme süresi damla yöntemiyle ölçülmüş

olup bu sürenin 15 saniyenin altında olması gerekmektedir. Havlu kumaşın su emme süresi ölçümü, TS EN 14697 Annex B standardına göre gerçekleştirilmiş; sabit bir yükseklikten (10 mm) numune yüzeyine bırakılan su damlasının tamamen kaybolması için geçen süre su emme süresi olarak kaydedilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada elde edilen iplikler ve özellikleri

Numune No	İplik Tipi	Numara (Ne)	Elyaf Türleri	Karışım Oranı (%)	Büküm Katsayısı (α e)	Ölçüm ve Test
1	Open-end kontrol numunesi	16/1	Pamuk	100%	3,9	Mukavemet ve düzgünlük
2	Open-end	16/1	Pamuk ve geri dönüştürülmüş pamuk	90/10	3,9	Mukavemet ve düzgünlük
3	Open-end	16/1	Pamuk ve geri dönüştürülmüş pamuk	80/20	3,9	Mukavemet ve düzgünlük
4	Open-end	16/1	Pamuk ve geri dönüştürülmüş pamuk	70/30	3,9	Mukavemet ve düzgünlük
5	Open-end	16/1	Pamuk ve geri dönüştürülmüş pamuk	60/40	3,9	Mukavemet ve düzgünlük
6	Open-end	16/1	Pamuk ve geri dönüştürülmüş pamuk	50/50	3,9	Mukavemet ve düzgünlük

Tablo 3. Çalışmada elde edilen havlu kumaşlar ve özellikleri

Numune No	İplik Adı	Numara (Ne)	Kumaş Tipi	Elyaf Karışım Oranı (%)	Ölçüm ve Test
1	Pamuk	16/1	Havlu kumaş	100%	Su emme kapasitesi
2	Pamuk ve geri dönüştürülmüş pamuk	16/1	Havlu kumaş	80/20	Su emme süresi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

%100 Pamuk ve Pamuk/Geri Dönüştürülmüş Pamuk karışımli ipliklerin karşılaştırmalı kalite değerleri Tablo 4'te verilerek geri dönüştürülmüş pamuğun iplik kompozisyonuna eklenmesinin etkisi ortaya konulmuştur.

%100 Pamuk ve Pamuk/Geri Dönüştürülmüş Pamuk karışımli ipliklerin düzgünlük ve tüylülük değerlerini gösteren grafik Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.

%100 Pamuk ve Pamuk/Geri dönüştürülmüş pamuk karışımli ipliklerin düzgünlük değerleri karşılaştırıldığında, iplik kompozisyonunda geri dönüştürülmüş pamuk oranının artmasıyla düzgünlük değerlerinde önce hafif bir düşüş daha sonra ise artış gözlenmiş ancak havlu kumaşta bu değerlerin olumsuz bir etkiye neden olmayacağı ortaya konulmuştur. Bu durum, geri dönüştürülmüş pamuk lifinin standart pamuğa göre daha düşük elyaf uzunluğu ve üniformiteye sahip olmasıyla ilişkilendirilmektedir. Ancak havlu kumaşların havlı bir yüzeye sahip olması sebebiyle iplik düzgünlüğündeki küçük

dalganmalar havlunun yüzey görünümüne ciddi bir olumsuzluk yansıtmemiştir.

Şekil 2'de verilen, ipliklerin tüylülük test sonuçlarına göre, %100 Pamuk ve Pamuk/Geri dönüştürülmüş pamuk karışımli ipliklerin yüzey özellikleri incelendiğinde, tüylülük değerlerinin birbirlerine yakın değerlerde olduğu ve geri dönüştürülmüş pamuk oranının tüylülüğü hafif düzeyde artırdığı gözlenmiştir. Bu durum, geri dönüştürülmüş pamuğun daha kısa lif içermesi sonucu liflerin iplik gövdesinden sarkması sebebiyle ortaya çıkmıştır. Ancak havlu kumaşın ilk yıkamalarında kısa liflerin uzaklaşmasıyla tüylenmenin stabil hale gelmesi öngörülmektedir.

Ne 16/1 %100 pamuk ve pamuk/geri dönüştürülmüş pamuk karışımli open-end ipliklerinin mukavemet ve uzama değerlerini gösteren grafikler Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.

Şekil 3'te verilen plik mukavemet (Rkm – kgf·Ne) değerlerine göre, %100 Pamuk ve Pamuk/Geri dönüştürülmüş pamuk karışımli ipliklerin mukavemet özellikleri değerlendirildiğinde, kısa elyaf içeren geri dönüştürülmüş pamuk oranının artmasıyla

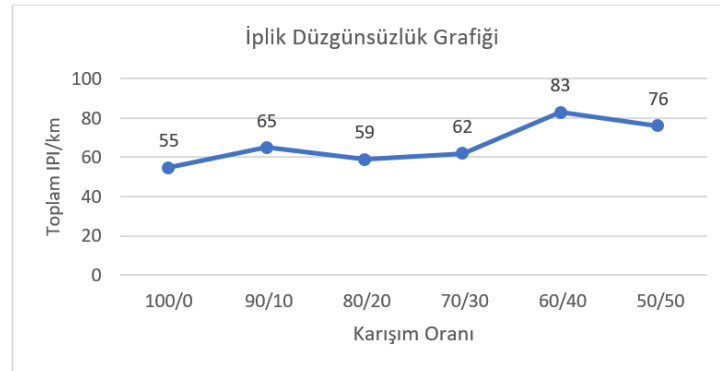
mukavemet değerlerinde düşüş olduğu ancak bu durumun ipliğin dokuma kumaş tezgahlarında çalışma performansını düşürecek etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Bu durumun havlu kumaşa olan etkisi değerlendirildiğinde, geri dönüştürülmüş lifler daha düşük mukavemetli olduğundan uzun vadeli yıkamalarda aşınmanın ve hav yapılarında kırılma riskinin artabileceği öngörülmektedir.

Şekil 4'te verilen, iplik uzama değerlerine göre, %100 Pamuk ve Pamuk/Geri dönüştürülmüş pamuk karışımı ipliklerin elastikiyet

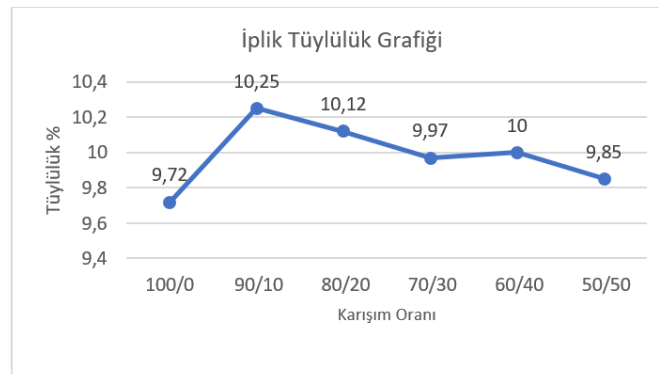
özellikleri değerlendirildiğinde, geri dönüştürülmüş pamuk oranının iplik elastikiyet özelliklerini önemli derecede etkilemediği gözlenmiştir. Bu durum, ipliklerin deformasyon altında benzer gerilme-uzama davranışı sergilediğini gösterir. İplik kompozisyonundaki kısa lif içerik artışına ve mukavemet düşüşüne rağmen uzama değerinin korunması sebebiyle iplik mukavemeti ve elastik davranış arasındaki denge bozulmamıştır. Buna bağlı olarak, mekanik dayanım ve iplik deformasyon toleransı gibi temel performans parametreleri korunmuştur.

Tablo 4. Ne 16/1 Ne Open-end Pamuk ve Pamuk/ Geri Dönüştürülmüş Pamuk Karışımı İpliklerin Düzgünsüzlük ve Mukavemet Değerleri

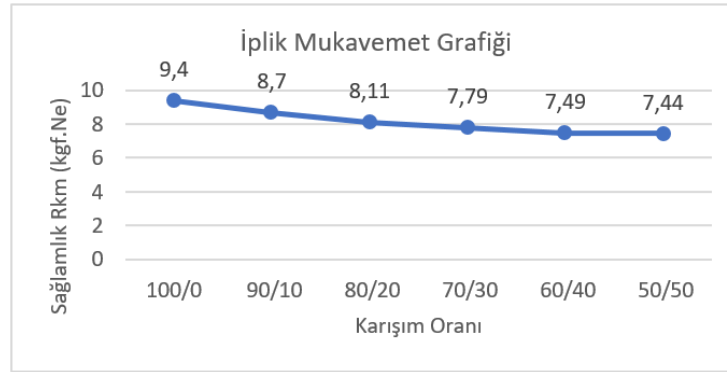
Hammadde Karışım Oranı (Pamuk/Geri Dönüştürülmüş Pamuk)	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50
%CVm	13,9	13,85	13,87	13,87	14,19	14,2
İnce yer -50%	4	5	3	4	3	3
Kalın yer +50%	36	35	33	36	41	46
280% NEPS	15	25	23	22	38	28
Toplam IPI/km	55	65	59	62	83	76
% H	9,72	10,25	10,12	9,97	10	9,85
Rkm (kgf.Ne)	9,4	8,7	8,11	7,79	7,49	7,44
% Uzama	4,96	3,55	3,33	3,3	3,08	3,18
B.Work(N.cm)	4,9	3,25	2,86	2,72	2,45	2,49



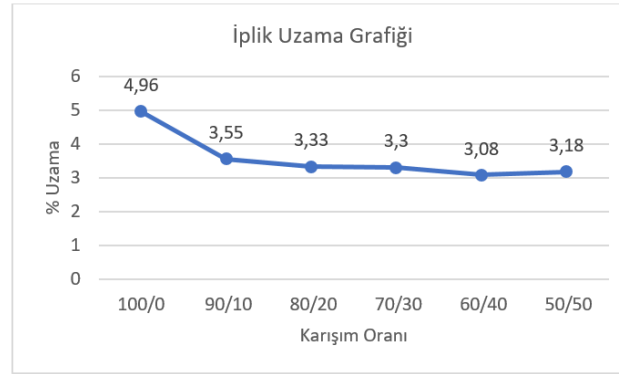
Şekil 1. Ne 16/1 Open-end Pamuk ve Pamuk/ Geri Dönüştürülmüş Pamuk Karışımı İpliklerin Düzgünsüzlük İplik Hataları Grafiği



Şekil 2. Ne 16/1 Open-end Pamuk ve Pamuk/ Geri Dönüştürülmüş Pamuk Karışımı İpliklerin Tüylülük Grafiği



Şekil 3. Ne 16/1 Open-end Pamuk ve Pamuk/ Geri Dönüştürülmüş Pamuk Karışımı İpliklerin Mukavemet Grafiği



Şekil 4. Ne 16/1 Open-end Pamuk ve Pamuk/ Geri Dönüştürülmüş Pamuk Karışımı İpliklerin Uzama Grafiği

Çalışma kapsamında elde edilen %100 pamuk ve %80 pamuk-%20 geri dönüştürülmüş pamuk karışımı ipliklerden havlu kumaşlar elde edilmiştir. Havlu kumaşın su emme kapasitesi test sonuçları Tablo 5'te, su emme süresi test sonuçları ise Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Havlu Kumaşların Su Emme Kapasitesi Test Sonuçları

Numune Adı / Yapılan Test	Ne 16/1 O.E %100 Pamuk Hav İpliği	Ne 16/1 O.E Pamuk Geri Dönüştürülmüş Pamuk 80/20
Kuru Ağırlık (gr)	7,636	7,673
Islak Ağırlık(gr)	52,44	47,76
Su Emme Kapasitesi(%)	587	522

Çalışma kapsamında geliştirilen havlu kumaş ve kontrol numunesinin su emme kapasiteleri karşılaştırıldığında, geri dönüştürülmüş elyaf içerikli olarak geliştirilen havlu kumaşın %100 pamuk kullanılarak elde edilen havlu kumaşın su emme kapasitesine yakın bir su emme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, hidrofil özelliğe sahip geri dönüştürülmüş pamuğun kısa lif içeriğine ve düşük mukavemetine rağmen, lif elastikiyetinin korunması dolayısıyla havlu yüzeyindeki su tutan hav yapılarının stabil kalması sayesinde su

emme kapasitesinin önemli ölçüde olumsuz olarak etkilenmediğini göstermektedir.

Tablo 6. Havlu Kumaşların Su Emme Süresi Test Sonuçları

Test Numunesi	Su Emme Süresi
Ne 16/1 O.E %100 Pamuk	0,5 sn
Ne 16/1 O.E Pamuk Geri Dönüştürülmüş Pamuk 80/20	2 sn

Çalışma kapsamında geliştirilen havlu kumaş ve kontrol numunesinin su emme süreleri incelendiğinde, geliştirilen havlu kumaşın geri dönüştürülmüş elyaf içermesine rağmen iyi bir su emme süresine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, kısa liflerin yüzey alanını artırması ve iplik içerisindeki kapiler yapının korunması sayesinde suyun lifler arasında hızlı ve etkin bir şekilde dağılması ile açıklanabilir.

4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, pamuk ve pamuk/geri dönüştürülmüş pamuk karışımı ipliklerden üretilen havlu kumaşların özellikleri incelenmiştir. Geri dönüştürülmüş pamuk oranının artması ipliklerde düzgünlük ve mukavemet üzerinde sınırlı değişimlere yol açsa da, havlu kumaşın havlı yapısı nedeniyle bu

farklılıklar kumaş performansını olumsuz etkilememiştir. Kısa liflerin varlığı tüylülük değerlerinde hafif artışa neden olmuş, ancak ilk yıkamalar sonrasında tüylerin stabil hâle geleceği öngörülmektedir. İplik elastikiyetinin korunması sayesinde mekanik dayanım ve deformasyon toleransı etkilenmemiştir. Su emme kapasitesi ve süreleri açısından geri dönüştürülmüş lifli havlu kumaş, %100 pamuklu kontrol kumaşa yakın performans göstermiştir; bu durum, kısa liflerin yüzey alanını artırması ve iplik içindeki kapiler yapının yanı sıra lif elastikiyetinin korunmasıyla suyun hızlı ve etkin şekilde dağıldığını göstermektedir. Bu çalışma, yüksek oranlı geri dönüştürülmüş pamuk kullanımına rağmen open-end teknolojisiyle üretilen hav ipliklerinde hedeflenen mukavemet ve düzgünlük değerlerinin başarıyla elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Elyaf temizleme ve tarama işlemleri sonrasında atık pamuk elyafı, iplik eğirmeye uygun nitelikte bir hammaddeye dönüştürülmüş; böylece üretim süreçlerinde tekrar kullanılabilir hale getirilerek hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli bir kazanım sağlanmıştır.

Geri dönüştürülmüş pamuk karışımli hav ipliklerinden üretilen kumaşların iyi bir emicilik, yumuşak tuşe ve sürdürülebilirlik gibi özellikleri, bu ipliklerin yüksek kaliteli havlu kumaş üretiminde rahatlıkla kullanılabilmesini göstermektedir. İplik mukavemeti ve düzgünlüğü değerlerinin kalite standartlarını karşılar düzeyde gerçekleşmesi, kısa elyaf kullanımının kontrol altına alınabileceğini kanıtlamaktadır. Böylelikle geri dönüştürülmüş pamuk, yalnızca çevresel açıdan değil, performans açısından da güvenle tercih edilebilecek bir hammadde olarak öne çıkmaktadır.

Ekonomik açıdan bakıldığında, geri dönüşüm pamuk lifleriyle üretilen ipliğin hammadde maliyetinin %100 pamuk ipliğine kıyasla yarı yarıya daha düşük olduğu, toplam üretim maliyetinde ise yaklaşık %20 oranında tasarruf sağladığı belirlenmiştir. Bu durum, çevresel faydaların yanı sıra firmalara da önemli düzeyde maliyet avantajı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, geri dönüştürülmüş pamuk karışımli ipliklerin open-end sistemine uyarlanması, havlu kumaşlarda görülen hav yatma problemlerinin çözümüne katkı sağlayabileceğini ve literatürde bu alandaki boşluğu dolduracak nitelikte önemli veriler sunduğunu göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, hem yeni Ar-Ge çalışmalarına ışık tutmakta hem de sürdürülebilir tekstil üretimine yönelik akademik bilgi birikimini zenginleştirmektedir.

Sonuç olarak, tekstil atıklarının geri kazanımıyla hammadde bağımlılığının azaltılması, yerli kaynakların daha verimli kullanılması ve döngüsel ekonomiye katkı sağlanması mümkün hale gelmiştir. Sanayi atıklarının azaltılması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi yönünde önemli bir adım niteliği taşıyan bu çalışma, enerji ve maliyet verimliliği yüksek open-end iplik üretimiyle sürdürülebilir ve rekabetçi yerli tekstil üretiminin güçlenmesine katkıda bulunmaktadır. Geliştirilen bu geri dönüşüm odaklı teknoloji ve süreçler, Türkiye'nin yeşil mutabakat hedefleri ve sürdürülebilir tekstil vizyonuyla doğrudan örtüşmekte ve sektörel dönüşümde öncü bir rol üstlenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Biyada S., Urbanavičius J.,(2025), Circularity in textile waste: Challenges and pathways to sustainability, Cleaner Engineering and Technology, Volume 24, 100905.
2. Andini, E., Bhalode, P., Gantert, E., Sadula, S., & Vlachos, D. G. (2024). Chemical recycling of mixed textile waste. Science advances, 10(27), eado6827. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado6827>.
3. S. Uyanık and T. Kaya Nacarkahya, "Evaluation of the Bursting Strength and Pilling Properties of Knitted Fabrics Produced from Recycled Yarns with Cotton Hard Waste," Journal of Testing and Evaluation 52, no. 5 (September/October 2024): 2936–2948. <https://doi.org/10.1520/JTE20230376>
4. Alp, G., Yıldırım, N., Kertmen, M., & Türksöy, H. G. (2023). Investigation of performance properties of denim fabrics produced from recycled cotton blended yarns. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 25(74), 275–285. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2023257402>
5. Yavaşcaoğlu, A. (2012). Tekstil Katı Atıkları, Katı Atık Oluşumunun Azaltılması Ve Geri Kazanımı. Mesleki Bilimler Dergisi (Mbd), 1(2), 137-148.
6. UNCCD. (2018). Thirsty for fashion: The impact of cotton on water resources. United Nations Convention to Combat Desertification. https://catalogue.unccd.int/1352_thirsty-for-fashion-soil-association-report.pdf
7. Leal Filho, W., Perry, P., Heim, H., Dinis, M. A. P., Moda, H., Ebhuoma, E., & Paço, A. (2022). An overview of the contribution of the textiles sector to climate change. Frontiers in Environmental Science, 10, Article 973102. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.973102>
8. Textile Exchange. (2025). Materials Market Report.
9. Taher, H., Bechir, A., Mohamed, B., Faouzi, S., 2009. Influence of Spinning Parameters and Recovered Fibers from Cotton Waste on the Uniformity and Hairiness of Rotor Spun Yarn. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 4(3), s. 36-44.
10. Hasani, H., Tabatabaei, S., Semnani, D., (2010). Determining the Optimum Spinning Conditions to Produce the Rotor Yarns from Cotton Wastes, Industria Textilă, 61(6), s. 259-264.
11. Khan, K., Rahman, H., (2015). Study of Effect of Rotor Speed, Combing-Roll Speed and Type of Recycled Waste on Rotor Yarn Quality Using Response Surface Methodology. Journal of Polymer and Textile Engineering, 2(1), s. 47-55.
12. Khan, K., Hossain, M., Sarker, R., (2015). Statistical Analyses and Predicting the Properties of Cotton/Waste Blended Open-End Rotor Yarn Using Taguchi OA Design. International Journal of Textile Science, 4(2), s. 27-35.