

Modern Tekstil Mühendisliği: Malzemeler, Prosesler ve Uygulamalar



Editör
AYŞE ÖZKAL



BİDGE Yayınları

Modern Tekstil Mühendisliği: Malzemeler, Prosesler ve Uygulamalar

Editör: AYŞE ÖZKAL

ISBN: 978-625-372-976-9

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



Önsöz

Tekstil mühendisliği, geleneksel üretim yaklaşımlarının ötesine geçerek; ileri malzemeler, dijital üretim teknikleri, fonksiyonel performans kriterleri ve sürdürülebilirlik odaklı çözümlerle sürekli gelişen, çok disiplinli bir mühendislik alanı hâline gelmiştir. Günümüzde üç boyutlu baskı ve hibrit üretim yaklaşımlarından yüzey modifikasyon tekniklerine, spor giysilerde ısı konfor analizlerinden dijital izlenebilirlik ve sürdürülebilirlik uygulamalarına kadar geniş bir konu yelpazesi, tekstil mühendisliğinin hem akademik hem de endüstriyel boyutunu yeniden şekillendirmektedir.

Bu kitap, **Modern Tekstil Mühendisliği: Malzemeler, Prosesler ve Uygulamalar** başlığı altında; tekstil mühendisliğinde güncel araştırma konularını, yenilikçi üretim teknolojilerini ve performans temelli uygulamaları bir araya getirerek, alandaki bilgi birikimine bütüncül bir katkı sunmayı amaçlamaktadır. Kitapta yer alan bölümler; ileri malzeme tasarımı, üretim ve proses geliştirme, fonksiyonel ve konfor odaklı tekstil yapıları, yüzey modifikasyonu, dijitalleşme ve sürdürülebilirlik perspektiflerini hem teorik hem de uygulamalı yönleriyle ele almaktadır. Bu eser, hızla değişen teknolojik ve çevresel gereklilikler doğrultusunda tekstil mühendisliğinin geleceğine yönelik yeni araştırma alanları ve uygulama perspektifleri sunmayı hedeflemektedir.

Bu kitabın ortaya çıkmasında değerli katkılarıyla yer alan tüm yazarlarımıza, uzmanlık alanlarındaki güncel ve özgün çalışmalarıyla literatüre sağladıkları katkılar için içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, akademik yayıncılığa verdiği önem ve bu eserin okuyucularla buluşmasını sağlayan destekleri için **BİDGE Yayınları**'na teşekkürlerimi sunar, kitabın, tekstil mühendisliği alanında çalışan ve öğrenen tüm paydaşlara fayda sağlamasını temenni ederim.

Editör

Dr. Öğretim Üyesi Ayşe ÖZKAL

İÇİNDEKİLER

POLYESTER KUMAŞLARIN YÜZEY MODİFİKASYONU İLE BOYANABİLİRLİLİK VE RENK PERFORMANSININ ARTIRILMASI	1
--	---

ŞEYMA YALÇIN TURAN, ALİ KARA

YÜN KATKILI POLYESTER, VİSKON VE ELASTAN HARMANLI KUMAŞLARIN TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ	26
---	----

MUTLU KURBAN, NAZİME SEYREK KURBAN, SELMA ÜSTÜN

SPOR GİYSİ ISIL KONFORU VE TÜKETİCİ ALGISI	45
--	----

SERTAÇ GÜNEY

ÜÇ BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİLERİNİN TEKSTİL UYGULAMALARI: FDM TABANLI YAPILAR VE HİBRİT ÜRETİM YAKLAŞIMLARI	65
---	----

AYŞE ÖZKAL

ADDRESSING GREENWASHING IN THE TEXTILE SECTOR THROUGH DIGITAL PRODUCT PASSPORTS	107
--	-----

DERYA TAMA BİRKÖKÇÜ, EDA ACAR

BÖLÜM 1

POLYESTER KUMAŞLARIN YÜZEY MODİFİKASYONU İLE BOYANABİLİRLİLİK VE RENK PERFORMANSININ ARTIRILMASI

ŞEYMA YALÇIN TURAN¹
ALİ KARA²

Giriş

Tekstil endüstrisi, tarih boyunca insan yaşamının ayrılmaz bir parçası olmuş ve günümüzde sadece temel bir ihtiyaç alanı değil, aynı zamanda estetik, fonksiyonellik ve yenilik arayışının odak noktası haline gelmiştir. Tekstilde kaliteyi belirleyen en temel unsurlardan biri renktir. Renk, genellikle tüketicinin bir ürün hakkında fark ettiği ilk şeydir ve estetik algının şekillenmesinde doğrudan etkili olur. Bir ürünün estetik algısı, tüketici üzerinde bıraktığı ilk izlenim çoğunlukla renk ile belirlenir; bu nedenle renk, tekstil ürünlerinde yalnızca görsel bir özellik değil, aynı zamanda kaliteyi, yeniliği ve farklılaşmayı yansıtan ilk göstergedir (H&M Supplier Colour Guideline, 2017). Renk oldukça öznel bir olgudur; günlük yaşamda bir renge verilen tepki çoğunlukla kişisel zevke

¹ Karesi Polyester ve Petrokimya Sanayi A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa/Türkiye, Orcid: 0000-0002-7633-2576

² Prof. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Bursa/Türkiye, Orcid: 0000-0003-2457-6314

bağlıdır. Ancak tekstil uygulamalarında renk değerlendirmeleri yalnızca öznel olarak ele alınamaz. Bu nedenle, tekstil endüstrisinde renklerin doğru şekilde belirlenmesi ve kalite kontrolünün sağlanması için nesnel ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir. Boyama işlemlerinde kullanılan lifin kimyasal yapısı ve boyarmaddenin özellikleri, elde edilen sonucun kalitesini doğrudan etkiler. Doğal lifler genellikle kimyasal yapılarındaki fonksiyonel gruplar sayesinde farklı boyarmaddelerle kolayca etkileşime girebilirken, sentetik liflerde bu süreç daha karmaşıktır. Özellikle polyester gibi hidrofobik karaktere sahip liflerin boyanması, yapılarındaki düşük reaktivite nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Bu durum, polyester liflerinin boyanabilirliğini artırmaya yönelik yeni yüzey modifikasyon tekniklerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda renk teorisi, lif-boyarmadde etkileşimleri ve yeni boyama yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar, tekstil biliminde önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Geliştirilen yöntemler, yalnızca renk kalitesini artırmakla kalmayıp aynı zamanda sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve çevre dostu üretim gibi hedeflere de katkı sağlamaktadır. Özellikle son yıllarda polimer kimyası temelli yüzey modifikasyon yaklaşımları, polyesterin farklı boyarmadde sınıfları ile etkileşimini mümkün kılan yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Renk ve Boyama Teorisi

Renk, ışığın farklı dalga boylarının göz tarafından algılanması sonucu ortaya çıkan bir olgudur. Renk, boyarmaddelerin ışığı nasıl absorbe ettiği ve yansıttığı ile belirlenir. Boyarmaddeler, belirli dalga boylarındaki ışığı absorbe ederken, absorbe edilmemiş dalga boyları yansır ve gözümüz tarafından algılanır. Örneğin, kırmızı bir kumaş mavi ve yeşil ışığı absorbe eder, kırmızı ışığı ise yansıtır; bu nedenle kırmızı olarak algılanır. Boyamada amaç, istenen renk tonunun ortaya çıkmasını sağlamak için uygun boyarmaddenin seçilmesi ve doğru uygulama koşullarının sağlanmasıdır. Renk teorisi, bu süreci anlamak ve kontrol etmek için

temel bir rehber sunar. Renklerin birbirleriyle ilişkisi, kontrastları ve uyumları, tekstil ürünlerinde hem estetik hem de fonksiyonel etkiyi belirler. Temel renkler, ikincil renkler ve ara tonlar gibi sınıflandırmalar, tasarım ve üretimde renk kombinasyonlarını planlamada yol gösterir. Ayrıca renk harmonisi ve kontrast kuralları, ürünün görsel çekiciliği ve boyama sürecinin doğruluğu açısından kaliteyi doğrudan etkiler. Bu nedenle renk, tekstil boyamacılığında yalnızca görsel bir özellik değil, aynı zamanda boyama kalitesinin ve ürünün ilk izleniminin temel göstergesidir.

Tekstilde bir rengi elde etmek, yalnızca tek bir boyarmadde kullanmakla sınırlı değildir; çoğu zaman istenen tonu elde etmek için birden fazla ana renk bir araya getirilir. Temel renkler kırmızı, sarı ve mavi olup, bu renkler farklı oranlarda karıştırılarak ara tonlar ve zengin renk karışımları elde edilir. Örneğin, turuncu bir ton elde etmek için kırmızı ve sarı belirli oranlarda karıştırılır; sarı oranı arttıkça turuncu daha açık ve parlak, kırmızı oranı arttıkça daha koyu ve sıcak bir ton ortaya çıkar. Boyama sürecinde kullanılan ana renkler, istenen rengin yoğunluğu ve doygunluğu gibi özelliklere göre dikkatle oranlanır. Üretimde, renk formülasyonları genellikle spektral ölçümler veya renk yoğunluğunu belirleyen diğer yöntemlerle hassas bir şekilde ayarlanır. Eğer boyama sırasında hedeflenen renk elde edilemezse, renk ayarlama işlemleri yapılır. Burada dikkat edilmesi gereken, renklerin tamamlayıcı ilişkileridir. Örneğin, mavi ve sarı birbirini dengeleyebilir; kırmızı ve yeşil de öyle. Bir renk fazla koyu veya ton farkı taşıyorsa, yalnızca açık renk eklemek yerine, tamamlayıcı renkler küçük oranlarda eklenerek denge sağlanır. Örneğin, koyu bir yeşil fazla mavi içeriyorsa, kırmızı eklenerek ton dengelenir. Benzer şekilde, sarı bir tonu daha sıcak veya soğuk yapmak için kırmızı veya mavi tamamlayıcıları kullanılır. Bu tür ayarlamalar, özellikle seri üretimde renk tutarlılığını sağlamak ve kaliteyi kontrol etmek için önemlidir.

Tekstilde renk değerlendirmesi, yalnızca gözle yapılan öznel gözlemlerle sınırlı kalmaz. Bu nedenle objektif ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir. Spektrofotometre, tekstil yüzeyinin ışığı absorplama ve yansıma özelliklerini ölçerek, renk değerlerini sayısal olarak belirler. K/S değerleri ise boyarmaddenin lif üzerinde ne kadar etkili bağlandığını ve renk yoğunluğunu göstermede yaygın olarak kullanılır. K/S değeri, Kubelka–Munk denklemi kullanılarak hesaplanır (Kubelka, 1948):

$$K / S = \frac{(1 - R)^2}{2R}$$

Burada R, belirli bir dalga boyunda kumaşın yansıma oranıdır. K değeri absorpsiyon katsayısını, S değeri ise saçılma katsayısını temsil eder. Bu hesaplama sayesinde, farklı boyama işlemlerinde kullanılan boyarmaddelerin kumaş üzerindeki etkinliği sayısal olarak karşılaştırılabilir. Kumaş daha fazla ışığı absorpladığında R azalır ve buna bağlı olarak, K/S değeri artar ve bu da rengin daha doygun ve yoğun olduğunu gösterir. Ayrıca, CIELAB renk uzayı (L, a, b*)** tekstilde yaygın olarak kullanılan bir renk değerlendirme sistemidir:

- L* değeri rengin açıklık-koyuluk derecesini gösterir (0 = siyah, 100 = beyaz).
- a* değeri kırmızı (+a) ile yeşil (–a) arasındaki eksenı ifade eder.
- b* değeri ise sarı (+b) ile mavi (–b) arasındaki eksenı tanımlar.

Bu üç parametre birlikte, bir rengin sayısal olarak tam tanımlanmasını sağlar. Renk farkı ölçümleri genellikle ΔE değeri ile ifade edilir; bu değer, hedef renk ile elde edilen renk arasındaki farkın sayısal büyüklüğünü belirtir. Üretimde düşük ΔE değerleri,

daha yüksek renk tutarlılığı ve kaliteyi gösterir. Spektrofotometre ölçümleri, K/S değerleri ve parametreleri birlikte kullanıldığında, renk ayarlama süreçlerinde tamamlayıcı renklerin ve boyarmadde oranlarının doğru şekilde uygulanmasını destekler. Böylece hem estetik hem de teknik açıdan istenen sonuçların elde edilmesi sağlanır.

Boyarmaddelerin Kimyasal Yapıları

Tekstil boyarmaddeleri, liflerin yüzeyine kimyasal veya fiziksel yollarla bağlanabilen ve onlara kalıcı renk kazandırabilen organik ve inorganik bileşiklerdir. Bu boyarmaddeler, sadece estetik bir işlev görmekle kalmaz; aynı zamanda liflerin ışık, yıkama ve sürtünme gibi çevresel etkilere karşı dayanıklılığını da etkiler. Organik boyarmaddeler genellikle aromatik halkalar ve kromofor-oksochrom grupları ile çeşitli fonksiyonel gruplar içerir. Aromatik halkalar, delokalize pi elektron sistemine sahiptir ve ışığın belirli dalga boylarını absorbe ederek gözle algılanan renk oluşumunu sağlar. Kromofor gruplar, molekülün renkli görünmesini sağlayan ve genellikle konjuge çift bağlar, azo veya nitro gibi yapıları içeren ışık absorpsiyon merkezleridir. Oksokrom gruplar doğrudan renk oluşturmaz, ancak elektron verici özellikleri sayesinde kromoforların absorpsiyon kapasitesini ve renk yoğunluğunu artırır. Fonksiyonel gruplar ise boyarmaddenin lifle bağlanma kapasitesini belirler. Elektron alışverişi ve hidrojen bağları gibi etkileşimler aracılığıyla lif yüzeyine tutunmayı sağlar ve boyamanın kalıcılığında kritik rol oynar. Böylece boyarmaddeler, hem renk oluşturma hem de lifle etkileşim açısından oldukça karmaşık ve etkili sistemlerdir (Zollinger, 2003).

Kromofor Gruplar

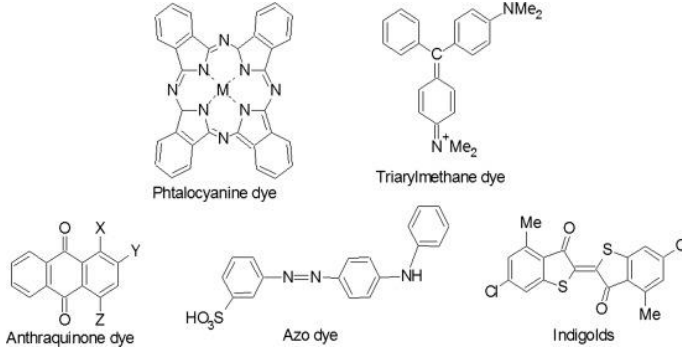
Kromoforlar, boyarmadde moleküllerinde ışığın görünür bölgede absorpsiyonunu sağlayan ve genellikle konjuge çift bağlar içeren fonksiyonel gruplardır. Bu yapılar, molekülün renk

kazanmasını mümkün kılan temel absorpsiyon merkezleri olup, UV ve görünür bölgedeki emilimden sorumludur. Tek başlarına renk oluşturabilseler de çoğunlukla oksokrom gruplarla birlikte bulunarak daha geniş bir renk yelpazesi ve farklı tonların ortaya çıkmasına katkı sağlarlar. Doymamış ve konjuge sistemlerin parçası olarak elektron delokalizasyonunu artıran kromoforlar, belirli dalga boylarının absorpsiyonunu mümkün kılar. Böylece boyarmaddelerin renk verme gücü ve yoğunluğu, kromoforlar ile oksokromlar arasındaki etkileşimlere bağlıdır. Etkileşimlerle doğrudan ilişkilidir (Sanchez vd., 2018).

Başlıca kromofor gruplar şunlardır (IARC, 2010):

- **Azo grubu ($-N=N-$):** Boyarmaddelerde en yaygın kromofor yapılarından biridir. Konjuge sistemlerle birleştiğinde canlı ve parlak renklerin elde edilmesini sağlar.
- **Nitro grubu ($-NO_2$):** Elektron çekici özellikleri sayesinde kromoforların absorpsiyon kapasitesini değiştirir ve renk yoğunluğunu etkiler.
- **Karbonil grupları ($-C=O$) ve kinon yapıları:** Özellikle keton ve kinon yapıları, delokalize pi elektron sistemi ile güçlü ışık absorpsiyonu sağlayarak koyu ve zengin renkler oluşturur.
- **Olefinik çift bağlar ($-C=C-$):** Konjuge çift bağ sistemine katkıda bulunarak renk oluşumunu güçlendirir ve molekülün renk tonunu değiştirir.
- **Antrakinin yapıları:** Aromatik ve keton gruplarını içeren bu yapılar, özellikle mavi ve kırmızı tonların elde edilmesinde yaygın olarak kullanılır.

Şekil 1. Kromofor grubu içeren bazı boyarmaddeler



Oksokrom Gruplar

Oksokromlar, boyarmadde moleküllerinde tek başına renk oluşturmaz; ancak kromoforların etkisini güçlendirir, absorpsiyon dalga boyunu kaydırır ve liflerle kimyasal etkileşimlerde kritik rol oynar. Bu gruplar, elektron donör veya akseptör özellikleri sayesinde molekülün rezonans yapısını stabilize eder ve kromoforların renk verme kapasitesini artırır.

Başlıca oksokrom gruplar şunlardır:

- -OH (hidroksil)
- -NH₂ (amin)
- -SO₃H (sülfonik asit)
- -COOH (karboksil)
- -NR₂ (amin türevleri)

Oksokrom gruplar, boya molekülünün kromofor iskeletine kovalent bağlı, yüklü veya yüksüz atom gruplarını içerir. Kromoforların aksine $\pi-\pi^*$ geçişlerine katılmazlar ve bu nedenle 200 nm'nin üzerindeki dalga boylarında belirgin bir absorpsiyon oluşturmazlar. Bunun yerine, n elektron geçişleri aracılığıyla absorpsiyon özelliklerini etkilerler. Bu gruplar, absorpsiyon dalga boyunu ve

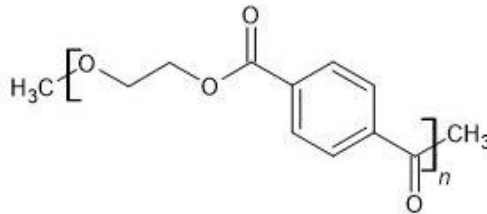
emilim maksimumunun şiddetini değiştirerek kromoforlarla birlikte işlevsel bir bütün oluşturur. Eğer dalga boyu daha uzun bir dalga boyuna kayarsa (kırmızı kayma, batokromik etki) veya daha kısa bir dalga boyuna kayarsa (mavi kayma, hipsokromik etki), kromoforların ışığı absorbe etme özellikleri değişir. Ayrıca absorpsiyon maksimumunun şiddeti artarsa buna hiperkromik etki, azalırsa buna hipokromik etki denir; böylece bu gruplar, kromoforlarla birlikte boyarmaddenin renk ve yoğunluk özelliklerini belirleyen işlevsel bir bütün oluşturur. Böylece farklı λ_{max} değerine sahip renk tonları elde edilebilir. Ayrıca oksokrom gruplar, liflerle hidrojen ya da iyonik bağlar kurarak boyarmaddelerin afinitesini artırır ve boyamanın kalıcılığına katkı sağlar (Sanchez vd., 2018).

Tekstil Lifleri ve Boyama Yöntemleri

Polyester Lifleri

Polyester lifleri, günümüzde en yaygın kullanılan sentetik liflerin başında gelir ve esas olarak polietilen tereftalat (PET) yapısındadır. PET, tereftalik asit veya dimetil tereftalat ile etilen glikolün polikondenzasyonu sonucu elde edilir.

Şekil 2. Polyester kimyasal yapısı



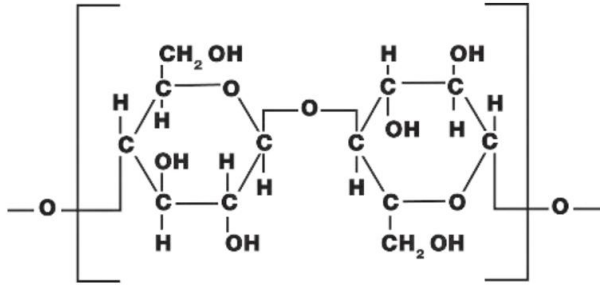
Polyester lifleri apolar ve inert karakterdedir. Bu inertlik, polyester liflerinin kimyasal reaktivitesinin düşük olmasına ve lif yüzeyine boya moleküllerinin bağ yapmasının zor olmasına yol açar. Polyesterin önemli bir özelliği de yüksek kristallik derecesidir. PET

zincirleri aromatik halkalar sayesinde sert ve rijit bir yapı kazanır. Moleküler zincirler düzenli şekilde paketlenmiştir ve bu düzenlilik boya moleküllerinin lif içine girmesini zorlaştırır. Boyarmaddeler lifin kristal bölgelerine nüfuz edemez, yalnızca amorf bölgeler üzerinden difüze olabilir. Bu durum, polyesterin boyanabilirliğini sınırlayan en temel faktördür. Ayrıca polyester lifleri hidrofobik karakterdedir. Yapılarında hidrojen bağı yapabilecek serbest –OH veya –COOH grupları sınırlı olduğundan, su ile etkileşimleri oldukça zayıftır. Bu nedenle polyester lifleri suda çözünür boyarmaddelerle boyanamaz. Bunun yerine, çözünmeyen fakat küçük ve hidrofobik yapılı olan dispers boyarmaddeler kullanılır (McIntyre, 2005). Disperse boyalar, suya neredeyse çözünmeyen, özellikle polyester gibi hidrofobik lifler için kullanılan noniyonik boyalardır. Bu boyalar, su içinde ince dağılımını korumak için dispersiyon ajanları ile birlikte uygulanır. Yüksek sıcaklıklarda boyama yapılması gerektiği için boyaların bir kısmı süblimleşebilir; bu nedenle süblimasyona karşı stabilitelere göre sınıflandırılırlar. Polyester liflere tutunma fiziksel kuvvetlerle gerçekleşir ve renk haslığı genellikle çok iyidir. Polyester, naylon, akrilik ve triasetat gibi lifler bu boyalarla boyanabilir. Yüksek sıcaklık (130°C) ve basınçlı banyolar ile boyama yapılabilir. Boya moleküllerinin küçük ve düz yapısı, polimer moleküller arasına girmelerini kolaylaştırır (Majumdar vd., 2012). Disperse boyaların uygulanmasında dispersiyon ajanları kritik öneme sahiptir. Suyu eklenen ajanlar, boyayı küçük ve stabil kolloidal parçacıklar hâline getirerek lif tarafından alınmasını kolaylaştırır. Boya, lif ile dinamik bir denge hâlinde ve transfer büyük ölçüde monomoleküler çözeltiden gerçekleşir. PET lifleri, disperse boyalar ile mükemmel renk derinliği ve renk haslığı sağlar. Ancak boyaların PET içinde difüzyon hızı düşük olduğundan, ticari boyama işlemleri genellikle taşıyıcı kullanılarak düşük sıcaklıkta (carrier dyeing, 100°C) veya yüksek sıcaklıkta basınçlı banyolarda (HT dyeing, 130–140°C) gerçekleştirilir (Ketema ve Worku, 2020).

Pamuk Lifleri

Tekstilin en önemli doğal ham maddelerinden biri olan pamuk, yapısal olarak β -D-glikoz monomerlerinden oluşan selüloz adı verilen bir doğal polisakkarittir. Selüloz, bitkisel kaynaklı bir polimer olup, pamuk lifinin temelini oluşturur ve yüksek oranda kristalin yapısı ile tekstilde aranan özellikleri sağlar. Pamuk, doğal bir selüloz lifidir. Selüloz, $\beta(1\rightarrow4)$ glikozidik bağlarla bağlanmış D-glikopiranoz birimlerinden oluşur. Her glikozidik ünite de üç hidroksil grubu bulunur. Bu hidroksil grupları hem su ile hidrojen bağları kurarak pamuğun hidrofilik karakterini belirler, hem de boyarmaddelerle reaksiyona girme kapasitesi sağlar (Zhang vd., 2023).

Şekil 3. Pamuk kimyasal yapısı



Kaynak: İrfan, M. (2025, Eylül 29). Cotton fibers: Review of structure, properties, types and uses. Sootter. <https://sootter.com/blog/cotton-fibers-review-of-structure-properties-types-and-uses/> (Erişim: 29 Eylül 2025)

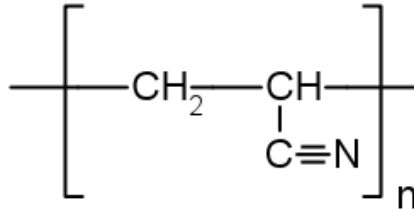
Pamuk lifleri gömlek, tişört, iç giyim ve pantolon gibi ürünlerin üretiminde kullanılır. Ayrıca, giysilerde pamuk lifleri tek başına veya polyester, viskon gibi diğer liflerle karışım halinde tercih edilebilir. Giyim sektöründe pamuk, çeşitli hava koşullarına uygunluğu ve yüksek termal ile dokunsal konforu nedeniyle sıkça tercih edilir (Rana vd., 2015). Pamuk, amorf ve kristalin bölgeler içeren doğal

bir selüloz lifidir; amorf bölgeler, boyarmaddelerin lif içine daha kolay difüze olmasını sağlar. Lifte bulunan hidroksil grupları, pamuk ile reaktif boyaların kovalent bağlar kurmasına olanak tanır ve böylece boya lif üzerinde kalıcı hale gelir. Boyama sırasında alkalik ortam sağlayan soda (sodyum karbonat), selülozun reaktif gruplarla bağlanmasını kolaylaştırırken, tuz boyanın lif yüzeyine tutunmasını artırarak renk homojenliği ve verimliliği iyileştirir. Pamuk farklı tip boyalarla da boyanabilir: reaktif boyalar kovalent bağ kurarken, direkt boyalar hidrojen bağları ve van der Waals kuvvetleri aracılığıyla lif üzerinde tutunur. Ayrıca küp boyalar ve kükürt boyaları da pamuk boyamacılığında yaygın olarak kullanılmaktadır. Reaktif boyaların reaktif grupları, pamuk lifindeki hidroksil gruplarıyla reaksiyona girerek boyanın sabitlenmesini sağlar; tek reaktif gruplu boyalar basit bir bağ oluştururken, çift reaktif gruplu boyalar daha yüksek renk sabitliği ve verimlilik sunar (Öztürk, 2011).

Akrilik Lifleri

Akrilik lifleri esas olarak poliakrilonitril (PAN) zincirlerinden oluşur; tekrarlayan birimler $-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CN})-$ şeklindedir.

Şekil 4. Poliakrilonitril kimyasal yapısı



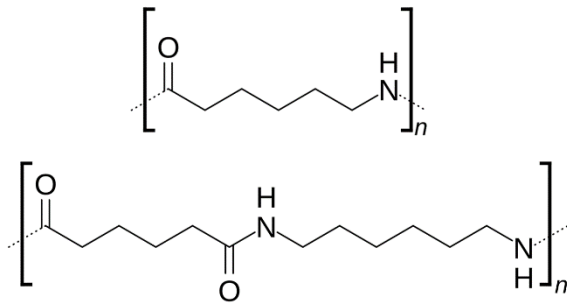
Nitril grupları ($-\text{C} \equiv \text{N}$) lifin kimyasal yapısında güçlü dipol momentler oluşturarak polar karakter kazandırır. Ancak saf PAN boyanabilirliği zayıf olduğundan, akrilik liflerin endüstriyel

üretiminde genellikle sülfonsiyona uğramış komonomerler (örn. sodyum metali akrilat) eklenir; bu sayede lif yapısına anyonik karakter kazandırılır ve boyarmaddelerle iyonik bağ oluşumu sağlanır. Bu nedenle akrilik lifler en çok katyonik boyalarla boyanır (Niaounakis, 2017). Katyonik boyalar, lifteki asidik gruplara bağlanarak boyamayı sağlar ve bu bağ genellikle güçlüdür; bu sayede boyalar iyi sabitlik özellikleri gösterir. Boyama sırasında lif yüzeyinde elektrostatik çekim ve diğer moleküler etkileşimler rol oynar. Boyama hızı ve doyumluk, boya konsantrasyonu, sıcaklık ve lifteki asidik grup miktarına bağlıdır (Beckmann, 1961).

Nylon Lifleri

Nylon, poliamid grubuna ait sentetik bir lif olup, yüksek mukavemeti, elastikiyeti ve hafifliği ile tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca aşınmaya ve yıpranmaya karşı dayanıklıdır, hızlı kurur ve nemi az emer. Bu özellikleri sayesinde spor giysileri, çoraplar, iç çamaşırları, çantalar ve endüstriyel kumaşlarda sıkça tercih edilir.

Şekil 5. Nylon 6 ve nylon 6,6 kimyasal yapıları



Naylon lifleri, yapısındaki amino uç grupları sayesinde asidik boyalarla kolayca boyanabilir. Asidik boyalar suda çözünerek lifle etkileşime girer ve renk tutunmasını sağlar. Boyama sırasında, banyonun pH'ı 2–4 civarına düşürülür; bu ortamda naylon lifleri

pozitif yük kazanır ve boyar maddeler lifin içine nüfuz ederek renk sabitlenir. Boyama genellikle 80–100°C sıcaklıkta yapılır ve sıcaklık ile pH kontrolü boyama verimliliğini önemli ölçüde etkiler. Naylon liflerindeki amino gruplarının sayısı sınırlı olduğu için boyama kapasitesi sınırlıdır, ancak liflerin modifikasyonu ile boyanın tutunma kapasitesi artırılabilir ve farklı renk tonları elde edilebilir. Ayrıca boyama sırasında kullanılan yöntemler ve lifin hazırlık aşamaları, elde edilecek rengin yoğunluğu ve dayanıklılığı üzerinde belirleyici rol oynar. Asit boyalarla boyanmış naylon lifleri parlak ve yoğun renkler sunarken, iyi ışık ve yıkama dayanıklılığı sağlayarak tekstil ürünlerinde hem estetik hem de fonksiyonel avantajlar kazandırır.

Polyester Kumaşlara Yüzey Modifikasyonu

Polyester lifleri, kimyasal yapısında bulunan ester bağları ve apolar karakterleri nedeniyle doğal olarak hidrofobik ve inerttir, bu da boyanabilirliklerini sınırlayarak lif-boyar madde etkileşimini güçleştirir; geleneksel olarak polyester boyama işlemleri yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 120–140°C) ve uzun sürelerde gerçekleştirilir, çünkü liflerin yoğun kristalin yapısı ve düşük polaritesi, boyanın lif içerisine nüfuz etmesini zorlaştırır; bu yüksek sıcaklık ve uzun süreli prosesler ise çok miktarda su ve enerji tüketimine yol açar ve hem üretim maliyetlerini artırır hem de çevresel yükü yükseltir. Bu nedenlerle, polyesterin boyanabilirliğini artırmak ve daha sürdürülebilir bir boyama süreci sağlamak için yüzey fonksiyonelleştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Kimyasal modifikasyonlar, aminoliz veya alkali/asit hidroliz gibi işlemlerle lif yüzeyine reaktif amin veya karboksil grupları kazandırarak liflerin polaritesini artırır ve boyar maddelerle iyonik, hidrojen veya Van-der-Waals bağları kurmasını sağlar; fiziksel yöntemler, ozonlama, plazma gibi işlemlerle lif yüzeyinde oksijen içeren fonksiyonel gruplar oluşturarak boyanın tutunmasını kolaylaştırır; biyoteknolojik yaklaşımlarda enzimler kullanılarak ester bağları

kısmen parçalanabilir ve lifin kimyasal reaktivitesi artırılabilir. Tüm bu yöntemler sayesinde polyester lifleri, daha düşük sıcaklıklarda ve daha kısa sürede boyanabilir hâle gelir, böylece su ve enerji tüketimi azalır, maliyet düşer ve çevresel etkiler minimize edilir; aynı zamanda liflerin polaritesi yükseldiği için homojen ve kalıcı renkler elde edilmesi de kolaylaşır, bu da polyesterin hem estetik hem de çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir tekstil materyali olmasını sağlar.

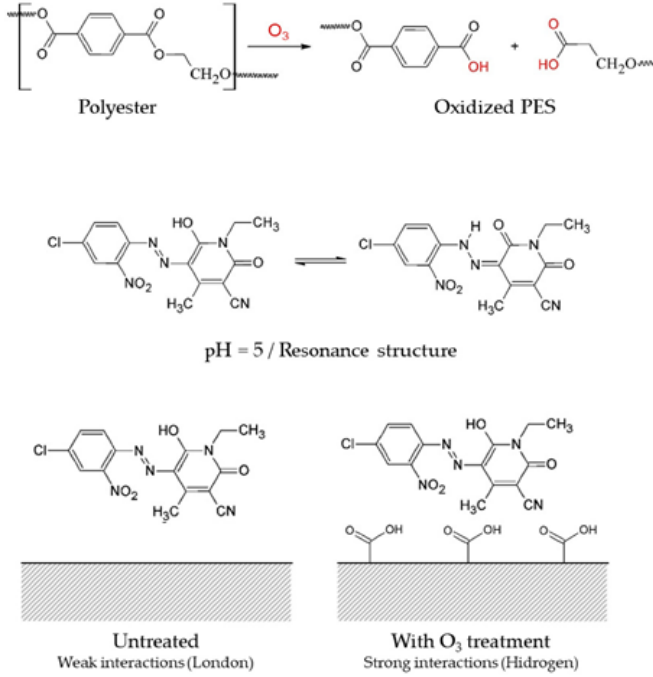
Literatür Örnekleri

Kim vd. (2021) bu çalışmada, polyester kumaşın dispers boyarmadde ile boya alma kapasitesini artırmak amacıyla dielektrik bariyer deşarj (DBD) plazma ön işlemi uygulamıştır. Öncelikle kumaş, üretim sırasında kullanılan yağlayıcı ve yardımcı maddelerden arındırılmak üzere yıkanmıştır. Ardından, kumaş 15 ila 90 saniye arasında değişen sürelerle DBD plazma ile işlenmiştir. Plazma işlemi sırasında kumaş yüzeyine iyon, radikal ve elektron bombardımanı yapılmış; bu etki kumaş yüzeyinde hem fiziksel hem de kimyasal değişiklikler oluşturmuştur. Fiziksel olarak, amorf bölgelerde zincir kırılmaları ve yüzey aşınma işlemleri meydana gelmiş, lif yüzeyinde yaklaşık 100 nm boyutunda nodüller oluşmuş ve yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Kimyasal olarak ise, kumaş yüzeyinde oksijenli fonksiyonel gruplar, özellikle –COOH grupları, artmıştır. Mukavemet açısından, çözgü yönünde belirgin bir değişiklik gözlenmezken, atkı yönünde plazma uygulamasıyla mukavemet hafifçe artmıştır; bunun, lifler arası sürtünmenin yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla ilişkili olabileceği belirtilmiştir. Ön işlemin ardından, üç farklı kumaş tipi değerlendirilmiştir: plazma ile işlenmemiş (P0), 30 s plazma ile işlenmiş (P30) ve 60 s plazma ile işlenmiş (P60) kumaşlar. Bu kumaşlar Dianix Red S-G disperse boyası kullanılarak farklı derişimlerde (0.1–4.5 %) boyanmıştır. Boyama işlemi oda sıcaklığında başlatılmış ve daha sonra 130 °C’ye çıkarılarak 60 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Boyanan kumaşlar,

önce akan suyla durulanmış, ardından yüzeyde kalan boyayı gidermek için asetonda yıkama işlemi uygulanmıştır. Boyama sonrası kumaşların renk yoğunluğu, Kubelka–Munk K/S değeri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, plazma ile işlem gören kumaşların boyarmaddeyi daha iyi bağladığını ve daha koyu renk elde edildiğini göstermiştir. Özellikle 60 s plazma uygulaması, renk derinliğinde (K/S) en yüksek artışı sağlamıştır. Ayrıca, düşük konsantrasyonlarda (0.1–2%) asetonda yıkama sonrası K/S değerlerinde çok değişiklik olmazken, yüksek konsantrasyonlarda (3–4.5%) yüzeyde biriken boyar madde nedeniyle K/S değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu durum, plazma işleminden önceki ve sonraki lif yüzeyi mikro yapısındaki değişikliklerle açıklanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, DBD plazma uygulaması (1 W/cm², 30–60 s, hava ortamında) polyester kumaşların boyama performansını önemli ölçüde artırmıştır. Plazma işlemi lif yüzeyinde hem fiziksel değişimler hem de kimyasal fonksiyonel grup artışı sağlayarak, boyarmaddenin lif içine daha kolay nüfuz etmesini mümkün kılmıştır. Bu yöntem, kısa süreli ve düşük enerjili uygulaması sayesinde endüstriyel ölçekte de uygulanabilir niteliktedir. Bununla birlikte, çalışmada sadece klasik yüksek sıcaklıkta boyama (130 °C) ve renk kuvveti ölçümleri yapılmıştır; renk haslığı ve düşük sıcaklıkta boyama gibi ek değerlendirmeler gelecekteki çalışmalar için önerilmiştir.

Gabardo vd. (2021) bu çalışmada polyester liflerinin zor boyanabilirlik problemini çözmek amacıyla ozon ile yüzey modifikasyonu uygulanmış ve lif yüzeyinde karboksil ve hidroksil gibi polar fonksiyonel gruplar oluşturarak hidrofilikliğin artırılması hedeflenmiştir.

Şekil 6. Ozon ile oksidasyona uğramış polyester

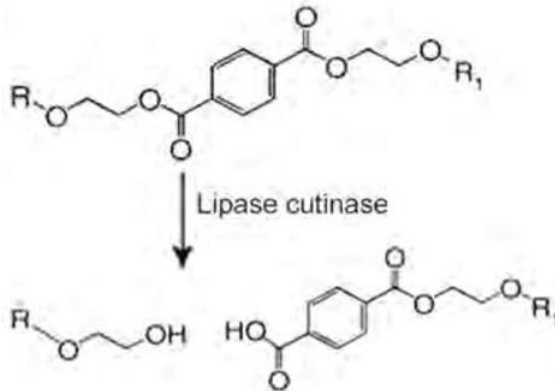


Deneysel olarak, polyester kumaş örnekleri (10 × 20 cm) UV-SURF X4 cihazında 17 W güçte ve 185–254 nm arası değişen emisyon spektrumuna sahip düşük basınçlı cıva lambaları kullanılarak ozona maruz bırakılmış, süreler 20, 30 ve 45 dakika olarak uygulanmıştır. Ozon muamelesi sonrası kumaşlar, Mathis ALT-1-B makinesinde 1:30 (m:v) banyo oranı ve 130 °C’de 30 dakika süreyle C.I. Disperse Yellow 211 ile boyanmış; boya banyosuna pH kontrolü için 2 g/L amonyum sülfat ve 1.5 g/L non-iyonik ıslatıcı eklenmiş, boyama sonrası 2 g/L sodyum bisülfid ve 3 g/L NaOH içeren indirgeme yıkama uygulanmıştır. Boyama sonrası FTIR-ATR ve Raman spektroskopisi ile karbonil (C=O) ve aromatik bantlarda değişimler gözlenmiş, oksidasyon ile yeni polar gruplar oluştuğu tespit edilmiştir. Zeta potansiyeli ölçümleri, ozon işlemi sonrası yüzey

yükünün daha negatif değerlere kaydığını göstermiş, sıvı emme testleri ozonlu kumaşın sıvı çekme kapasitesinin arttığını ortaya koymuştur. Sürtünme haslığı testlerinde özellikle 20 dakikalık ozon muamelesi sonrasında hem kuru hem de ıslak sürtünmede 5 değeri elde edilmiştir. Boyama kinetiği analizlerinde ozonlu kumaşın adsorpsiyon kapasitesi ozonsuz kumaşlara göre yaklaşık %10 daha yüksek çıkmış, ayrıca %8 daha az boya ile aynı K/S değerine ulaşılabilmiştir. Sonuç olarak, 20 dakikalık ozon işlemi optimum süre olarak belirlenmiş, polyesterin boyanabilirliği belirgin şekilde artırılmış, daha canlı renkler ve yüksek haslık elde edilirken boya, su ve enerji tasarrufu sağlanmış, çevresel ve ekonomik avantajlar elde edilmiştir.

J.A. Kumar ve M.S. Kumar (2020) bu çalışmada, 100% polyester kumaşların yüzey özelliklerini iyileştirmek ve boyanabilirliğini artırmak amacıyla lipaz enzimi ve alkali işlemler uygulanmıştır.

Şekil 7. Lipaz enzimi ile polyesterin hidrolizi



Kumaşlar öncelikle HCl ile yıkanarak yüzeydeki yabancı maddeler giderilmiş, ardından sodyum hidroksit ile alkali muamele yapılmıştır. Polyesterin ester bağlarını hedef alan lipaz enzimi, Tris

tampon çözeltisinde farklı konsantrasyonlarda (5%, 10%, 15%) ve değişik süre-sıcaklık koşullarında uygulanmış, işlem sonrasında enzim 80°C’de 10 dakika inaktive edilmiştir. Elde edilen kumaşlar daha sonra disperse boya C.I. Disperse Blue 284 ile 130°C ve pH 5 koşullarında yüksek sıcaklık yüksek basınç boyama makinesinde boyanmıştır. Analiz sonuçları, lipazla muamele edilmiş kumaşlarda ağırlık kaybının alkali işlemle karşılaştırıldığında çok daha düşük olduğunu göstermiştir; örneğin %15 konsantrasyonda lipazda ağırlık kaybı 4.6%, alkali işlemde 22%’dir. Lipaz işlemi kumaşın su emiciliğini artırmış, emicilik yüksekliği 6 cm’ye yükselmiş ve su damlası emme süresi 2.8 saniye olmuştur. SEM analizleri, lipazın yüzeyde daha az hasara yol açtığını doğrularken, FTIR spektroskopisi hidroksil ve karboksil gruplarının eklenerek kumaşın hidrofilikliğin arttığını göstermiştir. Su buharı geçirgenliği de lipazla işlenmiş kumaşlarda 1980 g/m²/gün olarak ölçülmüş, kontrol kumaşa ise 1260 g/m²/gün olmuştur. Boyama analizlerinde, 400 nm’de K/S değeri alkali ile boyanmış kumaşa 3.904 iken lipazla işlenmiş ve boyanmış kumaşa 4.021 olarak ölçülmüş; bu değer, lipazın boya tutuculuğunu artırarak renk derinliğini geliştirdiğini göstermektedir. Sonuç olarak lipaz enzimi, polyester kumaşlarda düşük yüzey hasarı ve ağırlık kaybı ile birlikte geliştirilmiş su emiciliği, boya tutuculuğu ve mekanik mukavemet sağlayarak çevre dostu ve etkili bir modifikasyon yöntemi sunmaktadır.

Kamel vd. (2011) bu çalışmada polyester kumaşın yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla atmosferik basınç altında oksijen plazma uygulaması yapmıştır. Çalışmada 200 g/m² ağırlığında düz dokuma polyester kumaş, 0–30 dakika arasında farklı sürelerde oksijen plazmasına tabi tutulmuş ve yüzey morfolojisi SEM ve X-ışını difraksiyonu ile, kimyasal yapısı ise FTIR spektroskopisi ile incelenmiştir. SEM görüntüleri, plazma uygulaması sonrası kumaş yüzeyinde boşluklar ve gözeneklerin oluştuğunu ve liflerin pürüzlülüğünün belirgin şekilde arttığını göstermiştir. X-ışını

difraksiyonu ile yapılan analizler, plazma uygulaması sonucu kristal boyutunda azalma ve kristallik oranının düşmesini ortaya koymuştur; örneğin, kristallik oranı, işlem görmemiş kumaşta %65,2 iken plazma ile işlem görmüş kumaşta %57,8 olarak bulunmuştur. FTIR spektroskopisi ise kumaş yüzeyinde yeni $-C-OH$ ve $-COOH$ gruplarının oluştuğunu ve oksijen içerikli fonksiyonel grupların artışı ortaya koymuştur. Boyama deneylerinde C.I. Disperse Blue 19 ve C.I. Disperse Brown 1 disperse boyaları kullanılmıştır. Plazma ile işlem görmüş kumaşlar $100^{\circ}C$ 'de, işlem görmemiş kumaşlar ise $130^{\circ}C$ 'de boyanmıştır. K/S değerleri plazma uygulamasıyla belirgin şekilde artmıştır: Örneğin, $100^{\circ}C$ 'de plazma işlemlili kumaşın K/S değeri Blue 19 için 14,8, Brown 1 için 13,5 iken, işlem görmemiş kumaşta $100^{\circ}C$ 'de sırasıyla 11,2 ve 10,1 olmuştur. $130^{\circ}C$ 'de ise K/S değerleri işlem görmemiş kumaş için Blue 19'da 15,2, Brown 1'de 12,7 iken, plazma işlemlili kumaşta sırasıyla 18,0 ve 16,3 olmuştur. Bu durum, plazma uygulamasının hem renk derinliğini artırdığını hem de boyama sıcaklığının düşürülebileceğini göstermektedir. Ayrıca, farklı plazma uygulama süreleri (10, 20, 30 dk) K/S değerlerini artırmış ve 30 dakika plazma süresinden sonra K/S değerlerinde dengeye ulaşılmıştır. 30 dakikalık plazma sonrası yüzey pürüzlülüğü $21,50\ \mu m$ 'ye ulaşmış ve K/S değerleri maksimum seviyeye çıkmıştır. Yaşlanma etkisi incelendiğinde, plazma uygulanan kumaşların yüzey pürüzlülüğü 0–63 gün arasında $21,50\ \mu m$ 'den $17,52\ \mu m$ 'ye düşmüş, K/S değerleri ise 0–42 gün arasında hafif bir azalma göstermiştir. Bununla birlikte, plazma uygulaması boyanın renk haslığını olumsuz etkilememiş ve yıkama, sürtünme, ter ve ışık testlerinde iyi performans sağlanmıştır. Sonuç olarak, oksijen plazma uygulamasıyla polyester kumaşlarda yüzey hidrofiliği, pürüzlülüğü ve boyanabilirliği artırılmış, enerji tasarrufu sağlayan ve çevre dostu bir boyama yöntemi geliştirilmiştir. Plazma ile işlem görmüş kumaşlar, daha düşük sıcaklıkta daha yüksek renk yoğunluğu elde edebilmiş ve boyanın kumaşa tutunma hızı artmıştır.

Bendak ve Raslan (2008) bu çalışmada, polyester kumaşların disperse boyalarla boyanabilirliğini artırmak amacıyla farklı alkoksitlerle ön işlem uygulanmasının etkilerini araştırmıştır. Çalışmada metoksit, etoksit, propoksit ve butoksit içeren alkollü sodyum hidroksit çözeltileri kullanılarak, polyester kumaşlar hem daldırma hem de padding teknikleriyle işlenmiştir. Daldırma tekniğinde 0,25 M sodyum hidroksit çözeltisi ile 24 saat oda sıcaklığında işlem uygulanmış ve kumaşlarda %15–20 ağırlık kaybı gözlenmiştir. Padding tekniğinde ise 1 M sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmış, kumaş %100 pick-up oranıyla sıkılmış ve 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bu teknik, çözeltinin tekrar kullanılabilmesine olanak sağlamış ve kumaşların fiziksel özelliklerinde belirgin iyileşmeler elde edilmiştir. Ön işlem sonrası polyester kumaşlar, 80–130°C aralığında farklı sürelerde (10–120 dakika) ve pH 4,5'te boyanmış, C.I. Disperse Red 60 ve Red 82 boyarmaddeleri kullanılmıştır. Boyama sonuçları, K/S değerleriyle ölçülmüş ve padding tekniği ile yapılan ön işlemlerde etoksit ön işlemlili kumaşın K/S değeri yaklaşık 4 olarak bulunurken, propoksit ile yaklaşık 3,5 ve işlem görmemiş kumaşta yaklaşık 1 olmuştur. Bu veriler, etoksit ile ön işlem uygulanmış kumaşın boya tutma kapasitesinde önemli bir artış sağladığını göstermektedir. Boyama kinetiği açısından, yarı boyama süresi ($t_{1/2}$) etoksit ön işlemlili kumaşta 5–6 dakika olarak ölçülmüş, propoksit ön işlemlili kumaşta 6 dakika, işlem görmemiş kumaşta ise 8–15 dakika arasında değişmiştir. Boyama hızı etoksit ön işlemlili kumaşta 0,5537–1,314, propoksit ön işlemlili kumaşta 0,5163–1,1886 ve işlem görmemiş kumaşta 0,2021–0,5163 aralığında bulunarak, ön işlem uygulanmış kumaşlarda boyama hızının 2–3 kat arttığı görülmüştür. Ayrıca etoksit ön işlem, boyamanın kaynama sıcaklığında bile taşıyıcı veya yüksek sıcaklık/yüksek basınç uygulamadan gerçekleştirilebilmesini sağlamış, böylece enerji tasarrufu ve çevre dostu bir boyama yöntemi sunulmuştur. Haslık testleri sonucunda, ön işlem görmüş kumaşların hem kuru hem de ıslak sürtünme dayanımı ile yıkama

dayanımı hafifçe artmış, disperse boyaların lif yüzeyine tutunması iyileşmiştir. Sonuç olarak, alkoksit ön işlem özellikle etoksit ile uygulandığında, polyester kumaşların disperse boyalarla boyanabilirliğini ve boyama hızını önemli ölçüde artırmakta, boyama homojenliğini geliştirmekte ve enerji verimliliği sağlayan çevre dostu bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, düşük sıcaklıkta ve taşıyıcı kullanmadan boyama yapılabilmesi açısından tekstil endüstrisi için pratik bir alternatif sunmaktadır.

Dumecha ve Nalankilli (2017) bu çalışmada, polyester liflerin yüzeyine spesifik fonksiyonel gruplar kazandırarak pratik kullanım özelliklerini artırmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla iki farklı kimyasal işlem uygulanmıştır: alkali hidroksilasyon için sodyum hidroksit ve aminoliz için etilen diamin. Aminoliz ile polyester lif yüzeyine amino ($\sim\text{NH}_2$) grupları, hidroksilasyon ile hidroksil ($\sim\text{OH}$) grupları kazandırılmış ve bu değişimler FTIR analizleri ile doğrulanmıştır. İşlem sıcaklığı, süresi ve kimyasal konsantrasyonu optimize edilerek maksimum renk alımı ve minimum mukavemet kaybı hedeflenmiştir. Her iki işlem de lif zincirlerinde kırılmalara yol açarak ağırlık ve mukavemet kaybına neden olmuştur. Bununla birlikte, lif yüzeyindeki reaktif grup sayısındaki artış ve cam geçiş sıcaklığındaki (T_g) düşüş, boyama verimini artırmıştır. Aminolizle elde edilen polyester lifler, asidik ve reaktif boyalarla boyandığında 400 nm dalga boyunda K/S değerleri sırasıyla 7.45–7.73 olarak ölçülmüş ve kontrol numunelere göre belirgin şekilde artış göstermiştir. Alkali hidroksilasyon uygulanan polyester liflerinde ise reaktif ve vat boyalarda K/S değerleri 2.12–2.23 arasında bulunmuş, mukavemet kaybı aminolize kıyasla daha düşük (%7.54–8.53) olmuştur. Aminoliz ile elde edilen amino grupları lifin hidrofilikliğini artırmış, su emme süresini kısaltmış ve kapiler yükselme testi ile belirlenen suyun lif boyunca ilerleme miktarını artırmıştır. Alkali hidroksilasyon da OH gruplarının artışı sayesinde su emme kapasitesi ve boyanabilirliği iyileştirmiş, ancak

lif dayanıklılığı açısından aminolize kıyasla daha az kayıp oluşturmuştur. Sonuç olarak, aminoliz ve alkali hidroksilasyon işlemleri, polyester liflerin doğal hidrofobik yapısını modifiye ederek boyanabilirliğini ve suya karşı wettability özelliklerini artırmıştır. Yapılan testlerde hem renk derinliğinde hem de kullanım konforunda anlamlı iyileşmeler elde edilmiş, özellikle farklı boya gruplarıyla yapılan boyamalarda lif yüzey modifikasyonunun etkisi açıkça gözlenmiştir.

Sonuç

Polyester, dayanıklılığı, yüksek mukavemeti ve kullanım kolaylığı nedeniyle tekstil endüstrisinde en yaygın kullanılan sentetik liflerden biridir. Ancak yapısında hidrofilik fonksiyonel grupların bulunmaması, boyarmadde ile etkileşimini sınırlamakta ve yalnızca dispers boyalarla, yüksek sıcaklık ve basınç altında boyanabilmesine imkân tanımaktadır. Bu durum, hem enerji tüketimini artırmakta hem de üretim maliyetlerini yükseltmektedir. Bu alışma kapsamında polyesterin boyanabilirliğini geliştirmeye yönelik çeşitli yöntemler incelenmiştir. Yüzey fonksiyonelleştirme, kimyasal modifikasyon, plazma ve enzimatik işlemler gibi yöntemlerin ortak noktası, lifin yüzey enerjisini artırarak boyarmadde ile etkileşimini kolaylaştırmasıdır. Böylece daha düşük sıcaklıklarda, daha kısa sürede ve daha az enerji tüketerek boyama mümkün hâle gelmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, polyesterin yüzeyinin fonksiyonelleştirilmesi yalnızca renk verimini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu bağlamda, fonksiyonelleştirme yöntemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, polyester boyamacılığında hem ekonomik hem de ekolojik açıdan daha verimli ve sürdürülebilir bir üretim anlayışının nn açacaktır.

Kaynakça

Beckmann, W. (1961). Dyeing polyacrylonitrile fibres with cationic dyes: A survey and evaluation of published work. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 77(12), 616–625.

Bendak, A., & Raslan, W. M. (2008). Dyeability improvement of polyester pretreated with some alkoxides. *Journal of Applied Polymer Science*, 108(1), 7-13.

Dumecha, B., & Nalankilli, G. (2017). Anionic dyeability of polyester fabric by chemical surfave modification. *Int. J. Mod. Trends Sci. Technol*, 4, 3-14.

Gabardo, R. S., de Carvalho Cotre, D. S., Lis Arias, M. J., Moisés, M. P., Martins Ferreira, B. T., Samulewski, R. B., ... & Bezerra, F. M. (2021). Surface modification of polyester fabrics by ozone and its effect on coloration using disperse dyes. *Materials*, 14(13), 3492.

H&M Supplier Colour Guideline. (2017, 22 Ağustos). Apparel Tutorial. <https://appareltutorial.blogspot.com/2017/08/h-supplier-color-guideline.html> (Erişim tarihi 23 Eylül 2025)

IARC Monographs Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2010). Some aromatic amines, organic dyes, and related exposures. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans (Vol. 99, p. 1). International Agency for Research on Cancer.

Kamel, M. M., El Zawahry, M. M., Helmy, H., & Eid, M. A. (2011). Improvements in the dyeability of polyester fabrics by atmospheric pressure oxygen plasma treatment. *The Journal of the Textile Institute*, 102(3), 220-231.

Ketema, A., & Worku, A. (2020). Review on intermolecular forces between dyes used for polyester dyeing and polyester fiber. *Journal of Chemistry*, 2020(1), 6628404.

Kim, T. N. T., Vu Thi Hong, K., Vu Thi, N., & Vu Manh, H. (2021). The effect of DBD plasma activation time on the dyeability of woven polyester fabric with disperse dye. *Polymers*, 13(9), 1434.

Kubelka, P. (1948). New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. *Part I. Journal of the Optical Society of America*, 38(5), 448–457.

Kumar, J. A., & Senthil Kumar, M. (2020). A study on improving dyeability of polyester fabric using lipase enzyme. *Autex Research Journal*, 20(3), 243-249.

Majumdar, A., Das, A., Alagirusamy, R., & Kothari, V. K. (Eds.). (2012). *Process control in textile manufacturing*. Elsevier.

McIntyre, J. E. (Ed.). (2005). *Synthetic fibres: Nylon, polyester, acrylic, polyolefin*. Taylor & Francis US.

Niaounakis, M. (2017). The problem of marine plastic debris. In *Management of marine plastic debris* (pp. 1–55).

Öztürk, M. (2011). Optimization of reactive dyeing of cotton fiber with real-time monitoring system (Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye).

Rana, S., Karunamoorthy, S., Parveen, S., & Fanguero, R. (2015). Life cycle assessment of cotton textiles and clothing. In Subramanian Senthilkannan Muthu (Ed.), *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of textiles and clothing* (pp. 195–216). Woodhead Publishing.

Sanchez, L. M., Ollier, R. P., Gonzalez, J. S., & Alvarez, V. A. (2018). Nanocomposite materials for dyes removal. In T. M. Makhoulf & A. B. Aliofkhazraei (Eds.), *Handbook of nanomaterials for industrial applications* (pp. 922–951).

Sanchez, L. M., Ollier, R. P., Gonzalez, J. S., & Alvarez, V. A. (2018). Nanocomposite materials for dyes removal. In T. M. Makhoulf & A. B. Aliofkhazraei (Eds.), *Handbook of nanomaterials for industrial applications* (pp. 922–951).

Zhang, Y., Chen, Z., Du, K., Bi, Y., Su, J., Zhang, Y., ... & Zhang, S. (2023). Functional natural wood-plastic composites: A review of antimicrobial properties and their influencing factors. *Industrial Crops and Products*, 201, 116705.

Zollinger, H. (2003). Color chemistry: Syntheses, properties, and applications of organic dyes and pigments. John Wiley & Sons.

BÖLÜM 2

YÜN KATKILI POLYESTER, VİSKON VE ELASTAN HARMANLI KUMAŞLARIN TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

MUTLU KURBAN¹
NAZİME SEYREK KURBAN²
SELMA ÜSTÜN³

Giriş

Günümüz tekstil endüstrisinde, küresel rekabetin artması, teknolojik gelişmeler ve refah düzeyindeki artış ile birlikte tüketici beklentilerinin çeşitlenmesiyle birlikte, kumaşlardan beklenen performans kriterleri de değişime uğramıştır. Bu amaçla tekstil sektöründe faaliyet göstermekte olan firmalar, günümüz şartlarına uyum sağlamak, katma değeri yüksek ürünler geliştirmek ve aynı zamanda mevcut ürünlerin kalitesini artırmaya yönelik estetik ve

¹ Öğr.Gör.Dr, Çukurova Üniversitesi, AOSB Teknik Bilimler MYO, Tekstil Teknolojisi Programı, Adana, Türkiye, Orcid: 0000-0001-9132-0349.

² Dr., Oğuz Tekstil A.Ş., Operasyonel Mükemmellik & Süreç Yönetimi, Adana, Türkiye., Orcid: 0000-0001-7419-7211.

³ Laboratuvar Müdürü / Tasarımcı, Oğuz Tekstil A.Ş., Tasarım Merkezi, Adana, Türkiye, Orcid: 0009-0002-3334-8663

konforlu fonksiyonel ürünleri üretmeleri beklenmektedir. Modern giyim konforunda geçmiş dönemlerden farklı olarak sadece estetik görünüm değil; ısı (termal) konfor, nem yönetimi, mekanik dayanıklılık ve sürdürülebilirlik gibi parametreler de belirleyici rol oynamakta ve bu amaç doğrultusunda üretimler gerçekleştirilmektedir. Tek bir elyaf türünün bu karmaşık ve çok yönlü beklentilerin tamamını aynı anda karşılaması genellikle mümkün olamamaktadır. Bu kısıtlılığı aşmak ve farklı liflerin üstün özelliklerini tek bir yapıda birleştirmek amacıyla geliştirilen elyaf harmanlama teknolojileri, fonksiyonel tekstil yüzeylerinin üretiminde en yaygın kullanılan strateji haline gelmiştir (Öngüt, 2007). Özellikle doğal ve sentetik liflerin optimum oranlarda karıştırılması, hem maliyet etkinliği sağlamak hem de nihai ürünün fiziksel özelliklerini birbirini tamamlayan etkilerle iyileştirmektedir (Forsythe & Thomas, 1989).

Sentetik lifler arasında pazar payı en yüksek olan polyester (PET); yüksek mukavemeti, kimyasal direnci, boyutsal kararlılığı ve aşınma dayanımı sayesinde tekstil sektörünün omurgasını oluşturmaktadır (Jaffe, Easts, & Feng , 2020). Buna karşın, polyesterin hidrofobik (su sevmeyen) yapısı, düşük nem emiciliği ve statik elektriklenme eğilimi, giysi konforunu olumsuz etkileyen ve "sentetik hissi" yaratan temel dezavantajlar olarak literatürde sıkça tartışılmaktadır (Hansen & Atwood, 2005). Polyesterin bu dezavantajını gidermek amacıyla, rejenere selülozik bir lif olan viskon sıklıkla tercih edilmektedir. Viskon lifleri, pamuğa benzer kimyasal yapısı sayesinde yüksek nem çekme kapasitesine sahip olup, kumaşa yumuşak bir tuşe, dökümlülük ve parlaklık kazandırmaktadır (Li, ve diğerleri, 2018). Ancak viskonun düşük yaş mukavemeti ve buruşmaya karşı direncinin zayıf olması, tek başına kullanımını sınırlamaktadır (Zhang, ve diğerleri, 2018). Bu bağlamda, Polyester/Viskon (P/V) karışımları, polyesterin dayanıklılığı ile viskonun konfor özelliklerini dengeleyen, bakımı

kolay ve ekonomik bir çözüm olarak dış giyimden ev tekstiline kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır (Bekiroğlu, Özcan, & Altay, 2022). Mevcutta kullanılmakta olan P/V karışımları her ne kadar başarılı olsa da, premium giyim segmentinde aranan doğal sıcaklık hissi ve üstün termal regülasyon özelliklerini sağlamada hayvansal liflerin yerini tam anlamıyla alamamaktadır. Bu noktada yün lifi, kendine özgü yüzey pulları (kütikül), doğal kıvrımlılığı (crimp) ve kompleks protein yapısı sayesinde mükemmel bir ısı yalıtımı ve nem yönetimi sunmaktadır (Lakshmanan, 2022). Yün, nemi buhar fazında absorbe edip dış ortama aktarırken açığa çıkan sorpsiyon ısısı sayesinde kullanıcıyı sıcak tutma yeteneğine sahip, benzersiz bir elyafır. Ancak yüksek hammadde maliyeti, üretim süreçlerindeki zorluklar ve bakım hassasiyeti (keçeleşme vb.) gibi dezavantajlar, yünün kullanım alanını sınırlamaktadır (Allafi, ve diğerleri, 2022). Bu bağlamda, maliyeti belirgin ölçüde artırmadan kumaşın katma değerini yükseltmeyi amaçlayan araştırmalar, “çoklu karışım” yaklaşımlarına odaklanmaktadır. Standart bir Polyester/Viskon karışımına düşük oranlarda (örneğin %10) yün ilave edilmesi, kumaşın tuşe ve termal performans özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik stratejik bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Surjit, 2024). Literatürde ikili lif karışımları üzerine çok sayıda çalışma bulunmasına karşın, düşük oranlı yün ilavesinin P/V kumaşların genel fiziksel performansı üzerindeki etkisini ele alan güncel ve kapsamlı çalışmalar sınırlı sayıdadır (Wang, Postle, & Zhang, 2003).

Bu çalışmanın amacı, geleneksel %100 yün kumaşlara kıyasla daha ekonomik, ancak doğal elyaf etkisini kısmen koruyan alternatif bir kumaş yapısı geliştirmektir. Bu doğrultuda, polyester/viskon/elastan harmanlarına %15 oranında yün ilavesi yapılarak yeni kumaşlar tasarlanmış ve üretilmiştir. Geliştirilen kumaşlar, %100 yün kumaşların tüm özelliklerini birebir sağlamamakla birlikte, yün katkısı sayesinde doğal elyaf algısını güçlendirmekte ve belirli performans özelliklerini muhafaza

etmektedir. Ayrıca, tasarlanan kumaşların fiziksel özelliklerinin konvansiyonel P/V kumaşlarla karşılaştırılabilir seviyelerde olması hedeflenmiş; gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, söz konusu kumaşların ISO ve müşteri standartlarını karşıladığını, hatta bazı parametrelerde daha üstün performans sergilediğini göstermiştir.

Materyal

Bu çalışmada, polyester/viskon karışımı kumaşlar temel alınmış; bu harmana yün elyaf ilavesiyle yeni bir karışım oluşturulmuştur. Harmana eklenen yün elyaf sayesinde, müşterilerin talep ettiği yünlü kumaş tuşesi ve görünümünün ekonomik olarak karşılanması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, elyaf boyalı ve kumaş boyalı olmak üzere iki farklı boyama yöntemi ile iki farklı harman karışımı kullanılarak toplam dört farklı kumaş tipi incelenmiştir. Bez ayağı örgü raporunda oluşturulan kumaş konstrüksiyonlarında müşteri talepleri esas alınmış; ancak teknik sınırlılıklar nedeniyle küçük ve onaylanabilir düzeyde değişiklikler yapılmıştır. Kullanılan kumaşlara ait konstrüksiyon bilgileri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1 Kumaş konstrüksiyonları

	Kumaş boyalı (KB)		Elyaf boyalı (EB)	
	A	B	A	B
Kumaş harmanı	63/32/5 PES/VIS/EL	52/29/14/5 PES/VIS/YÜN/EL	63/32/5 PES/VIS/EL	52/29/14/5 PES/VIS/YÜN/EL
Çözü harman	63/32/5 PES/VIS/EL	52/29/14/5 PES/VIS/YÜN/EL	63/32/5 PES/VIS/EL	52/29/14/5 PES/VIS/YÜN/EL
Atkı harman	63/32/5 PES/VIS/EL	52/29/14/5 PES/VIS/YÜN/EL	63/32/5 PES/VIS/EL	52/29/14/5 PES/VIS/YÜN/EL
Çözü no	28/2 65/35 PES/VIS+78 DTEX EA	28/2 55/30/15 PES/VIS/YÜN +78 DTEX EA	28/2 65/35 PES/VIS+78 DTEX EA	28/2 55/30/15 PES/VIS/YÜN +78 DTEX EA
Atkı no	28/2 65/35 PES/VIS+78 DTEX EA	28/2 55/30/15 PES/VIS/YÜN +78 DTEX EA	28/2 65/35 PES/VIS+78 DTEX EA	28/2 55/30/15 PES/VIS/YÜN +78 DTEX EA
Çözü sıklık	23,3	21,8	23,3	21,8
Atkı sıklık	18	17	18	17

Ham elyaftan üretilen ipliklerin dokunmasının ardından kumaşın boyanmasıyla elde edilen kumaşlar “Kumaş Boyalı” (KB), boyalı elyaftan üretilen ipliklerin dokunmasıyla elde edilen kumaşlar ise “Elyaf Boyalı” (EB) olarak adlandırılmıştır. Çalışmanın devam eden bölümlerinde, polyester/viskon karışımli kumaşlar **A**, polyester/viskon/yün karışımli kumaşlar **B**, kumaş boyalı kumaşlar **KB** ve elyaf boyalı kumaşlar **EB** kodları ile ifade edilmiştir.

Metot

Çalışmada kullanılan dört farklı kumaş tipinin karşılaştırılabilmesi amacıyla, ipliklerin tek kat hâllerine ve kumaşlara çeşitli testler uygulanmıştır. Uygulanan test ve metotlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2 Uygulanan testler

Testler	Test Metodu
Kopma Dayanımı ve Uzama	ISO 2062
Boncuklanma ve Yüzey Değişimi (Martindale Metodu)	ISO 12945-2
Yıkama Sonrası Boyut Değişimi	ISO 6330
Buharla Boyut Değişimi	ISO 3005
Kumaş Elastikiyeti	ISO 20932-1
Kopma Dayanımı (Kavrama metodu)	ISO 13934-2
Yırtılma Dayanımı	ISO 13937-2
Su haslığı	ISO 105-E01
Yıkama haslığı (40°C)	ISO 105-C06
Asit ter haslığı	ISO 105-E04
Alkali ter haslığı	ISO 105-E04
Sürme haslığı (Kuru)	ISO 105-X12
Sürme haslığı (Yaş)	ISO 105-X12

KB grubuna ait numuneler Parti hazırlama – Yıkama - Fikseli Kurutma – Yakma – Jet Boya – Halat Açma – Egalize – Sanfor – Mamül Kalite Kontrol, EB grubuna ait numuneler Parti Hazırlama – Egalize – Yakma – Yıkama – Kurutma – Apre – Sanfor – Mamül Kalite Kontrol işlem adımlarından geçerek üretilmişlerdir.

Bulgular ve Tartışma

Yapılan testler iplik ve kumaş (fiziksel ve kimyasal) testleri olmak üzere üç alt başlıkta değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

İplik Test Sonuçları

Çalışmada kullanılan ipliklerin USTER® TESTER 5 analiz sonuçları Grafik 1’de verilmiştir. Yün karışımlı tek kat ipliklerde çalışmalar sırasında büküm değeri; yünlü kumaşlarda yün içermeyen kumaşlara göre daha yüksek değerlerde ($T/m=790$) tutulmuştur. Burada uygulanan yüksek bükümün nedeni, mukavemeti esas olarak sağlayan polyester elyaf yerine doğal bir elyaf olan yünün karışıma dahil edilmesiyle oluşabilecek mukavemet kaybının önlenmesidir. İplik test sonuçları; düzgünsüzlük (U ve CVm) ile iplik hataları (ince yer, kalın yer ve neps) kapsamında değerlendirilmiştir.

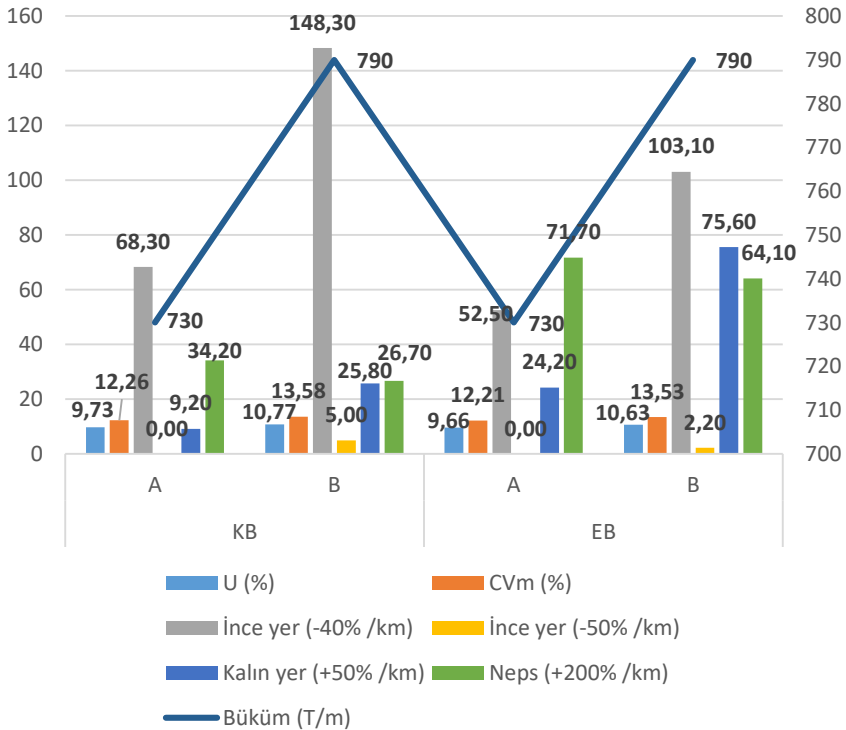
Düzgünsüzlük değerleri, iplik kütlesinin ne kadar stabil olduğunu göstermektedir. Değerlerin düşük olması daha pürüzsüz ve kaliteli iplikleri ifade eder. Hem kumaş boyalı ve hem de elyaf boyalı partilerde büküm değerleri daha düşük olmasına rağmen polyester/viskon harmanlı ipliklerin düzgünlük değerleri daha iyidir. Yün katkılı iplikler yüksek büküme rağmen doğal elyaf oldukları için düzgünsüzlük değerleri daha yüksektir. Yüksek büküm, iplikte dalgalanmaları artırmış; buna ek olarak kullanılan yün elyafı da iplik düzgünsüzlüğünün artmasına neden olmuştur.

Hatalar incelendiğinde yün elyaf katkılı ipliklerdeki ince ve kalın yer sayısını yün elyafının düzgünsüzlüğü nedeniyle daha yüksek olduğu görülmektedir. Kumaş boyalılarda polyester/viskon harmanlı ipliklerde kalın yer sayısı 9,20 iken, yün harmanlı iplikte 25,80 olmuştur. Elyaf boyalılarda ise 24,20’den 75,60’lara çıkmıştır. İnce yer sayısında da durum benzerdir. Kumaş boyalılarda ince yer sayısı 68,30’dan 148,30’a, elyaf boyalılarda ise 52,50’den 103,10’a çıkmıştır. İplik üretim sürecindeki çekim ayarları, iplik üzerinde düzensiz bir gerilim yaratarak kütlenin bazı yerlerde yığılmasına

(kalın yer), bazı yerlerde ise boşalmasına (ince yer) neden olmuştur. Yün elyafın harmana dahil edilmesi ipliğin "görsel kalitesini" gözle görülür derecede değiştirmiştir.

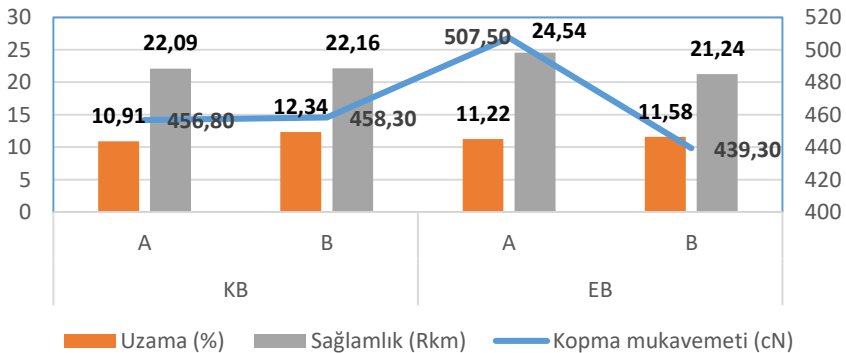
Neps, iplik üzerindeki küçük düğümçüklerdir. Kumaş boyalı grubundaki neps sayısı 26-34 arasındayken, elyaf boyalı grubunda 64-71 seviyelerine çıkmıştır. Elyaf boyama işlemi sırasında lifler birbirine sürtünür ve topaklanır. Bu topaklar eğirme sırasında tam açılmadığı için iplikte "Neps" olarak kalır. Bu, elyaf boyalı ipliklerin karakteristik bir dezavantajıdır. Hem kumaş boyalı, hem de elyaf boyalı grupta büküm arttıkça neps sayısı azalmıştır. Büküm, yüzeyde bulunan bazı gevşek lifleri iplik yapısının içine gömerek nepslerin gizlenmesine neden olmuş olabilir.

Grafik 1 İplik kalite değerleri



Grafik 2’de ISO 2062 standardına göre yapılmış olan “Kopma Dayanımı ve Uzama” test sonuçları paylaşılmıştır. Kumaş boyalı varyantların üretiminde kullanılan iplikler ham olduğu için hiçbir yaş işlem, sıcaklık veya kimyasala maruz kalmamıştır. Polyester ve viskon ayrı ayrı eriyikten boyalı iken yünün boyanma işlemlerinde ısı ve kimyasal işlem bulunmaktadır. Ham ipliklerin, iç gerilimleri henüz alınmamış, relakse olmamışlardır. Grafik 2 incelendiğinde en büyük dayanımı(507,5 cN / 24,54 Rkm) elyaf boyalı polyester/viskon harmanlı ipliklerin verdiği görülmektedir. Elyaf boyamadan sonra life verilen harman yağları mukavemet değerine katkı sağlamış olabilir. Lifler birbirine daha iyi tutunduğu için iplik koparken lifler daha az kaymakta, direkt lif mukavemeti devreye girmektedir. En yüksek uzama değerini (%12,34) ise kumaş boyalı yün takviyeli iplikler vermiştir. Ham iplikteki lifler henüz ısıyla karşılaşarak çekme göstermemiştir; bu aşamada yün elyafın doğal esneme yeteneği de etkili olmuştur. İplik çekme testine tabi tutulduğunda, lifler hem kendi esneme kapasitelerini kullanmakta hem de iplik yapısı içerisindeki doğal kıvrımlar açılmaktadır. Elyaf boyalı ipliklerdeki lifler, boya kazanındaki ısı etkisiyle ulaşabilecekleri maksimum kısalma seviyesine önceden ulaştıkları için, test sırasında kumaş boyalı olacak iplikler kadar uzama gösterememektedir.

Grafik 2 İplik dayanım değerleri

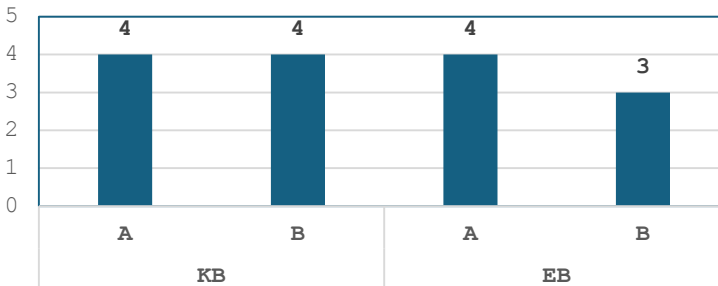


Kumaş Fiziksel Test Sonuçları

Grafik 3'te paylaşılan boncuklanma (pilling) testi sonuçları, önceki iplik düzgünsüzlüğü ve mukavemet analizlerini tamamlayan verilerden biridir. Grafikteki değerler, ipliğin sadece laboratuvarındaki teknik performansını değil, son kullanıcının elindeki kumaşın estetik ömrünü de etkilemektedir. Çıkan 3 ve genelinin 4 olduğu değerler müşteri standartlarını sağlamak için yeterli değer aralığındadır.

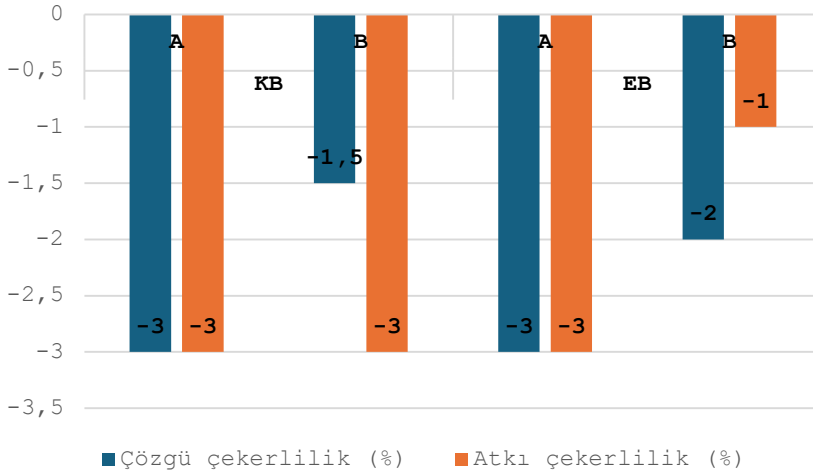
Kumaş boyalı grubunda büküm farkı ve yün elyaf ilavesi boncuklanmayı etkilememiş ancak elyaf boyalı grubunda kabul edilebilir azalış görülmüştür. Normal şartlarda ipliğe verilen büküm (T/m) arttıkça, lifler yapıya daha sıkı tutunur ve boncuklanma direncinin artması beklenir. Ancak elyaf boyalı yün harmanlı numunesinde değer 4'ten 3'e düşmesi, önceki analizlerde belirttiğimiz "bükümün iplik yapısını bozması" tezini desteklemektedir. Elyaf boyalı yün harmanlı ipliklerde ince/kalın yer hataları çok yüksektir. Kumaş yüzeyindeki bu düzensizlikler ve "kalın yerler", sürtünmeye daha fazla maruz kalarak tüylenmeye ve dolayısıyla boncuklanmaya) neden olmuş olabilir. Ayrıca yün elyaf ilavesiyle harmandaki polyester oranı azalmış bu da mukavemetin düşmesine neden olmuştur. Elyaf boyama işleminin liflerde bir miktar yıpranmaya neden olması ve bunun uygun olmayan büküm parametresiyle birleşmesi sonucunda, kumaşın aşınma direnci kumaş boyalı gruba kıyasla daha düşük bulunmuştur.

Grafik 3 Kumaş boncuklanma değerleri



Kumaşın boyutsal stabilitesi, genellikle dokuma atkısı/çözgü sıklığı ve iplik üzerindeki gerilimle ilgilidir. Grafik 4'te kumaş çekme değerleri verilmiştir. Her iki grupta da (KB ve EB) yün harmanlı varyasyonlar diğerine göre daha az çekme göstermiştir. Biraz daha fazla uygulanan büküm, iplik yapısını daha "tok" ve mukavemetli (fiziksel direnç anlamında) hale getirerek yıkama sırasında liflerin kısalma eğilimini bir miktar kısıtlamıştır. Ancak çekme değerini öncelikli olarak etkileyen parametrenin kullanılan elastan olduğu da değerlendirilmiştir. Özellikle elyaf boyalı yün elyaflı numune -%1 atkı çekmesi ile grubun en az çeken değeridir. Hem KB hem de EB polyester/viskon varyasyonlu numunelerde çözgü ve atkı -%3 ile standart değerler aralığında kalan bir çekme payı göstermiştir. Tüm gruplardaki çekme değerleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde ancak yünlü grubunda daha düşük ve değişken çekme değerleri görülmüştür.

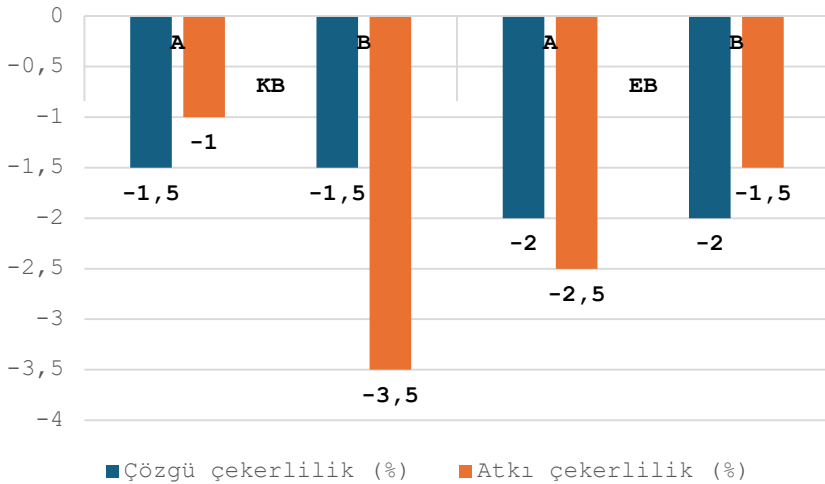
Grafik 4 Kumaş çekme değerleri



Grafik 5'de paylaşılan buharla boyut değişimi verileri, kumaşın konfeksiyon aşamasındaki ütüleme ve presleme gibi işlemler esnasındaki kararlılığını anlamamızı sağlar. Bu test,

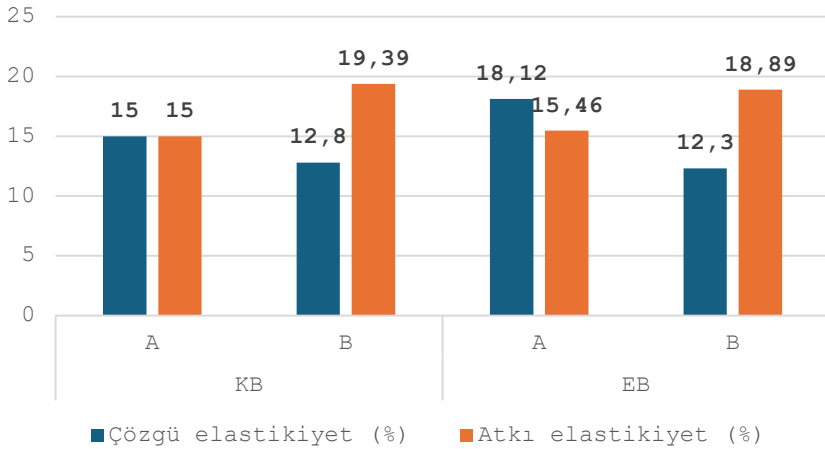
kumaşın yüksek ısı ve neme maruz kaldığında gösterdiği tepkiyi ölçmektedir. Kumaş boyalı polyester/viskon harmanlı varyasyonda çözgüde -%1,5, atkıda ise -%1 ile oldukça stabil bir performans sergilemiştir. Kumaş boyalı yünlü varyasyonda çözgü stabilitesi korunurken, atkı yönünde -%3,5 ile en yüksek çekme değerini vermiştir. Bu durum, biraz daha fazla uygulanan bükümün ipliğe yüklediği iç gerilimin buharla birlikte ani bir şekilde serbest kalması nedeniyle olabilir. Ayrıca buhar ile etkileşime giren elastanlı varyasyonlarda değişim daha fazla olmuştur. Elyaf boyalı polyester/viskon varyasyonunda çözgüde -%2, atkıda -%2,5 ile dengeli bir çekme göstermiştir. Polyester/viskon varyasyonlu numunelerde buharla çekme değeri boyutsal değişim ile paralel değerler göstermiştir. Elyaf boyalı yünlü varyasyonunda ise çözgüde -%2, atkıda -%1,5 değerleri elde edilmiştir. Yıkama çekerliliğinde olduğu gibi, buhar testinde de elyaf boyalı grubunda yünlü varyasyonun boyutsal stabilitesi diğerine göre bir miktar daha iyi sonuç vermiştir.

Grafik 5 Kumaş buharla çekme değerleri



Grafik 6’da kumaş elastikiyet değerleri paylaşılmıştır. Paylaşılan elastikiyet değerlerine etki eden en önemli parametre harmandaki elastandır. Ayrıca, yünlü varyasyonlarda uygulanan daha fazla bükümün iplik ve kumaş yapısı üzerindeki "yorucu" etkisi de etkilemektedir. Verilere baktığımızda çözgü ve atkı yönünde çok farklı iki davranış görülmektedir. Düşük bükümlü olan polyester/viskon varyasyonların çözgü yönünde hem kumaş boyalı (%15) hem de elyaf boyalı (%18,1) gruplarında yüksek esneklik sunarken, yünlü varyasyonlarında bu değerlerde düşüşler görülmüştür. Ancak bu azalmalar müşteri tolerans sınırı olan ± 3 değerleri içinde olduğu için teknik açıdan bir sorun yaratmamaktadır. Grafikte belirtilmiş olan elastikiyet değerleri yün elyaf ilavesinden ziyade elastan kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

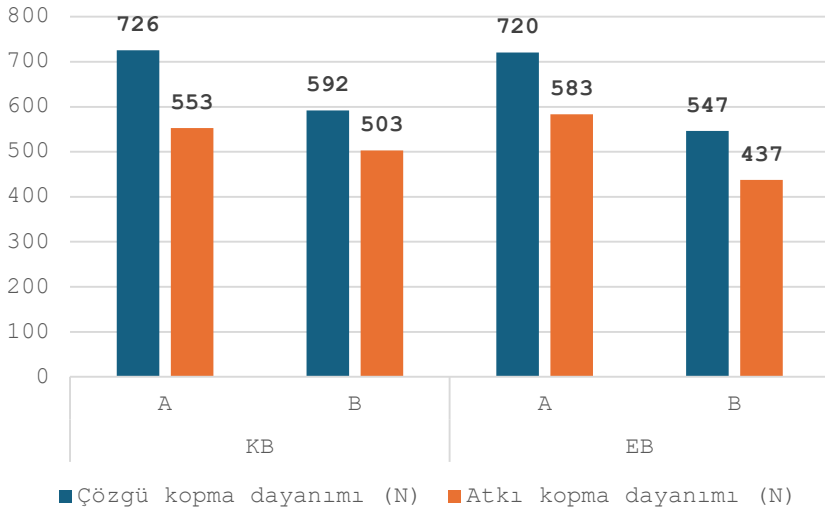
Grafik 6 Kumaş elastikiyet değerleri



Grafik 7’de paylaşılan kopma dayanımı verileri, daha fazla uygulanan bükümün kumaşın mukavemet değerini nasıl azalttığını göstermektedir. Hem kumaş boyalı hem de elyaf boyalı gruplarında PV kumaşların 720-726 N (Çözgü) ve 553-583 N (Atkı) bandında seyrederek çok güçlü bir yapı sergilemektedir. Elyaf boyalı polyester/viskon varyasyonlu numunenin atkıda en yüksek direnci

(583 N) göstermesi, ipliğin boya sonrası formunu koruduğunu göstermektedir. Bükümün artmasıyla birlikte mukavemet az da olsa etkilenmiştir. Çözgüde 720 N'dan 547 N'a, atkıda ise 583 N'dan 437 N'a varan kayıplar görülmüştür. Normalde büküm artışı mukavemeti bir noktaya kadar artırır. Ancak buradaki düşüş, liflerin aşırı gerilmeden dolayı "kritik büküm" noktasını aştığını ve eğirme esnasında hasar gördüğünü (lif kopmaları) göstermektedir. Grafikte gösterilen veri farklılıkları harman kaynaklı olup dayanımlar arasındaki farklar toleranslar dahilinde olup ve müşteri taleplerini karşılamaktadır. Ayrıca çıkan değerler normalde ISO ve müşteri standartlarının çok üzerindeki değerlerdir. EN ISO 13934-2 standardına göre limit değer 250 N iken çalışma kapsamındaki kopma dayanım verileri mim 437 N dan başlamaktadır.

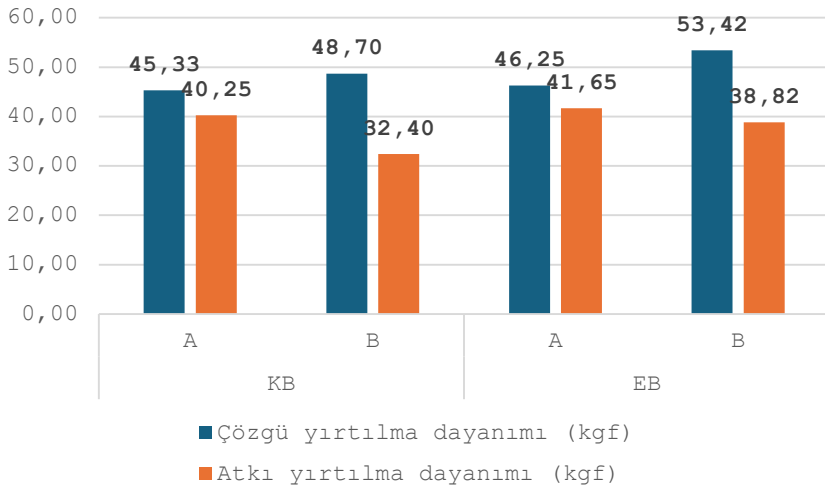
Grafik 7 Kumaş kopma dayanımı değerleri



Grafik 8'de paylaşılan yırtılma dayanımı değerleri kopma dayanımında olduğu gibi birincil olarak kumaş harmanı ile ilintilidir. Sonuçlar daha fazla uygulanan bükümün neden olduğu "kırılgenliği" ve düşük bükümün sunduğu "dengeyi" çok net bir şekilde

özetlemektedir. Yüksek bükümlü varyasyonların çözgü yırtılma dayanımının (48-53 kgf) düşük bükümlü varyasyonlarına (45-46 kgf) göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, yüksek bükümlü ipliklerin çözgü yönünde birbirine daha sıkı kilitlenmesinden kaynaklanan yerel bir direnç artışıdır. Atkı yönünde ise yüksek bükümlü varyasyonları (32,4 - 38,8 kgf), düşük bükümlü varyasyonlarının (40,3 - 41,7 kgf) altında kalmıştır. Bu düşüş, yüksek bükümün lifleri ne kadar yorduğunun ve atkı yönündeki mukavemet kaybının yırtılma direncine de yansıdığının bir göstergesi olabilir. Standart aralıklarında olan bu değerler ISO ve müşteri standartlarının çok üzerindeki değerlerdir. EN ISO 13937-2 standardına göre limit değer 15 N iken çalışma kapsamındaki yırtılma dayanım verileri mim 32 N değerine sahiptir.

Grafik 8 Kumaş yırtılma dayanımı değerleri



Kumaş Kimyasal Test Sonuçları

Tablo 3’de paylaşılan haslık testleri sonuçları tablosu, kumaşın kullanım ömrü boyunca rengini ne kadar iyi koruyacağını gösteren verileri içermektedir. Harmana eklenen yün elyafının haslık

değerlerine olumsuz bir etkisi olmamıştır. Haslık değerlerine asıl etkiyi kullanılan boyar madde özellikleri ve prosesler belirlemektedir.

Kumaş boyalı polyester/viskon varyasyonda; su, yıkama ve ter haslıklarında 3-4 seviyesinde kalarak grubun en düşük performansdır. Özellikle yaş sürme haslığının 3 olması, bu kumaşın nemli ortamlarda renk aktarma riski taşıdığını göstermektedir. Elyaf boyalı grubun her iki varyasyonunda genel olarak 4 seviyesinde stabil ve sonuçlar yüksek çıkmıştır. Elyaf boyama işleminin, boyayı lifin merkezine daha iyi hapsettiği bu verilerle doğru orantılıdır. Kuru sürme değeri tüm numuneler 4 ve 4-5 seviyeleriyle oldukça güvenlidir. Yaş sürme değeri kumaş boyalı polyester/viskon varyasyonunda 3'tür. Bu değer riskli olup renk verebilir. Diğer tüm varyasyonlarda haslık değerleri 3-4 olup ticari olarak kabul edilebilir seviyededir. Bu sonuç, elyaf boyalı (EB) ürünlerin ıslak kullanımda veya terleme durumunda kıyafetin diğer bölgelerine renk verme riskinin daha düşük olduğunu göstermektedir.

Genel olarak elde edilen haslık değerleri müşterilerin belirttiği aralıktadır. Bu nedenle harmana yün elyaf ilavesinin haslık açıdan olumsuz bir durum oluşturmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3 Kimyasal test sonuçları

Kimyasal Testler	Kumaş Boyalı		Elyaf Boyalı	
	A	B	A	B
Su Haslığı	3-4	4	4	4
Yıkama Haslığı (40°C)	3-4	4	4	4
Asit Ter Haslığı	3-4	4	4	4
Alkali Ter Haslığı	3-4	4	4	4
Sürme Haslığı (Kuru)	4	4-5	4	4-5
Sürme Haslığı (Yaş)	3	3-4	3-4	3-4

Sonuç

Bu çalışma, üniversite–sanayi iş birliği kapsamında, ilgili firmanın Tasarım Merkezi ile birlikte yürütülmüş olup, yün ilavesinin polyester/viskon esaslı kumaşlara kazandırdığı doğallık algısı ve tuşe özellikleri akademik bir çerçevede incelenmiştir. Pazar eğilimleri hâlâ %100 yün kumaşlara yönelmiş olsa da, yüksek hammadde ve üretim maliyetleri nedeniyle polyester/viskon karışımli kumaşlara olan talep giderek artmaktadır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmada, polyester/viskon kumaşların mevcut performans özellikleri korunarak, yün katkılı alternatif kumaş yapıları geliştirilmiştir.

Yün katkı oranının artırılması, kumaşların konfor, estetik algı ve performans özelliklerini olumlu yönde etkilerken, maliyet artışını da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, tasarım merkezi ile birlikte yürütülen çalışmalarda performans–maliyet dengesi gözetilmiş, optimum yün katkı oranları belirlenerek katma değeri yüksek kumaş yapıları elde edilmiştir. Geliştirilen kumaşlar, geleneksel yünlü kumaşlardan farklı olarak kuru temizleme gereksinimi olmaksızın ev tipi yıkamaya uygun olacak şekilde tasarlanmıştır.

Gerçekleştirilen fiziksel, mekanik ve kullanım performansı testleri sonucunda, geliştirilen yün katkılı polyester/viskon kumaşların, Zara ve Marks & Spencer gibi uluslararası markaların referans aldığı ISO standartlarında tanımlanan limit değerlerin üzerinde performans sergilediği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, söz konusu kumaşların endüstriyel üretime uygunluğunu ve ticari kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, firmanın Tasarım Merkezi ile birlikte yürütülen bu akademik çalışma sayesinde polyester/viskon kumaş çeşitliliği artırılmış; konfor özellikleri geliştirilmiş, bakım kolaylığı sağlayan, yıkanabilir ve katma değeri yüksek yenilikçi kumaş

yapıları elde edilmiştir. Çalışma bulguları, tekstil sektöründe maliyet etkin ve sürdürülebilir kumaş geliştirme süreçlerine bilimsel ve uygulamaya dönük önemli katkılar sunmaktadır.

Teşekkür

Bu akademik çalışmanın yürütülmesi sürecinde, üretim altyapısı, teknik bilgi birikimi ve uygulama desteği sağlayan **Oğuz Tekstil A.Ş. Tasarım Merkezi'ne** katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Allafi, F., Hossain, M., Lalung, J., Shaah, M., Salehabadi, A., Ahmad, M., & Shadi, A. (2022). Advancements in applications of natural wool fiber. *Journal of Natural Fibers*, 19(2), 497-512.
- Bekiroğlu, E., Özcan, G., & Altay, P. (2022). Improvement in pilling property of viscose/PET blended knitted fabric after garment dyeing. *The Journal of The Textile Institute*, 113(6), 971-982.
- Forsythe, S. M., & Thomas, J. B. (1989). Natural, Synthetic, and Blended Fiber Contents: An Investigation of Consumer Preferences and Perceptions. *Clothing and Textiles Research Journal*, 7(3), 60-64.
doi:<https://doi.org/10.1177/0887302X8900700310>
- Hansen, S., & Atwood, K. (2005). Polyester fibers. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.
- Jaffe, M., Easts, A., & Feng, X. (2020). Polyester fibers. M. Jaffe, & J. Menczel içinde, *Thermal Analysis of Textiles and Fibers* (s. 133-149). Woodhead Publishing.
doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100572-9.00008-2>
- Lakshmanan, A. (2022). Physical and chemical properties of wool fibers. *Wool fiber reinforced polymer composites* (s. 49-71). içinde Woodhead Publishing.
- Li, H., Legere, S., He, Z., Zhang, H., Li, J., Yang, V., . . . Ni, Y. (2018). Methods to increase the reactivity of dissolving pulp in the viscose rayon production process: a review. *Cellulose*, 25(7), 3733-3753.

- Öngüt, Ç. (2007). *Türk Tekstil Hazır Giyim Sanayinin Değişen Dünya Rekabet Şartlarına Uyumu*. Ankara: T.C. Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü Uzmanlık Tezi.
- Surjit, R. (2024). Blending of wool with other fibers: mixing of wool with other natural/synthetic fibers for different applications. *The wool handbook* (s. 533-558). içinde Woodhead Publishing.
- Wang, G., Postle, R., & Zhang, W. (2003). The tailorability of lightweight wool and wool-blend fabrics. *Journal of the Textile Institute*, 94(3-4), 212-222.
- Zhang, C., Ren, J., Ma, Y., Liu, Y., Tang, Y., & Qin, S. (2018). Preparation and adsorption properties of amphoteric viscose fiber. *Iranian Polymer Journal*, 27(9), 635-644.

BÖLÜM 3

SPOR GİYSİ ISIL KONFORU VE TÜKETİCİ ALGISI

Sertaç GÜNEY¹

Giriş

Spor giysiler, günümüzde sadece sportif aktivite içerisinde değil günlük hayatımızın da bir parçası olmuştur. Sağladığı esneklik ve hafiflik sayesinde giysi konforunu iyileştirme adına farklı tasarımlar spor giyim pazarında kendini göstermektedir. Günümüz tüketicileri, psikolojik ve fizyolojik açıdan kendilerini tatmin edebilecek konfor performans özelliğine sahip fonksiyonel giysileri tercih etmektedir. Vücuda serbest hareket imkânı sağlayacak şekilde iyi tasarlanmış bir giysinin aynı zamanda ısı konfor açısından da vücudun dengesini korumasına yardımcı olması gerekmektedir. Bu kapsamda giysi tercihlerinin belirlenmesinde giysi ısı konforunu etkileyen faktörlerin kullanıcılar tarafında da bilinmesi önemlidir. Özellikle aktif spor şartlarında kullanılacak ürünler için bu çok daha önem arz etmektedir. İlgilenenimi gören ve amatör olarak spor ile

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, El Sanatları Bölümü, 0000-0002-9301-0026

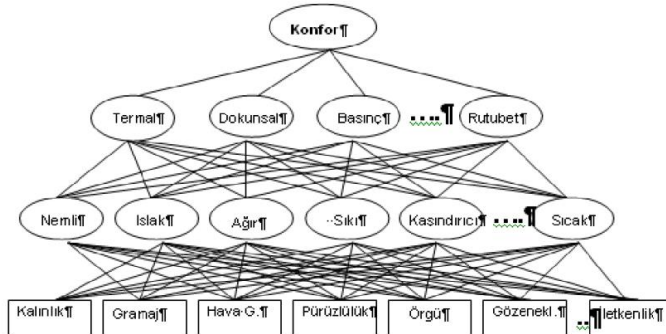
ilgilenen tüketicilerin, bilinçli tüketici örneği olarak giysi ısı konforu hakkında bilgi sahibi olması beklenmektedir.

Teknolojik gelişmelere paralel olarak insanların yaşam standartlarının yükselmesi sonucunda, kullanıcıların spor yaparken ihtiyaç duyduğu giysi ve diğer araç gereçlerden beklentileri, sadece sağlamlık, tasarım ve moda unsurlarına uygun olmaktan öteye geçmiş, performans ve giysi konforu en önemli beklentiler olmuştur (Devecioğlu & Altıngül, 2011). Bu beklentileri karşılamaya yönelik olarak ise son yıllarda giysi konforu konusundaki çalışmalar artmış ve yenilikçi ürünlerin geliştirilmesi konusunda ilerlemeler kaydedilmiştir.

Kullanıcıların konfor algısında göz önüne alınan önemli bir husus, vücut hareketi ile giysilerle sürekli dinamik etkileşim içinde olduğudur. Bununla beraber deri sıcaklığı, terleme oranı ve deri yüzeyindeki nem değeri gibi fizyolojik parametreler de giyim esnasında değişmekte; bu etkiler, mekanik ve ısı uyarılara yol açmaktadır. Bu uyarılar, kullanıcının konfor algısını belirlemektedir.

İnsanın duyuşsal algılama sistemine dayalı olarak yapılan sübjektif konfor değerlendirme mekanizması Şekil 1’ de gösterilmiştir (Kaplan, 2009).

Şekil 1 Giysi konforu değerlendirme mekanizması



Kaynak: (Kaplan, 2019)

Şekil 1’ de görüldüğü gibi konfor değerlendirme prosesi dört seviyede incelenebilir. Birinci seviye kumaş fiziksel özelliklerini içeren ‘fiziksel’ seviye olarak adlandırılabilir. Giysi vücutla temas ettiğinde vücutta oluşan nörofizyolojik uyarılar beyne iletilir ve bunun sonucu olarak terleme seviyesinin, kan basıncının ayarlanması ve titreme sonucu ısı üretimi gibi çeşitli mekanizmalar devreye girer. İkinci seviyede beyin birçok duyudan oluşan subjektif algıyı formüle edebilmek için uyarıları inceler ve sonuçta algıları üçüncü seviyedeki gibi gruplara ayırır. Son olarak da geçmiş tecrübeler ve o anki duygulara dayanarak tek bir konfor değerlendirmesi ortaya koyar (Kaplan, 2009).

Çivitçi ve Dengin, koşu giysileri konforunun kullanıcılar tarafından değerlendirilmesi üzerine yaptıkları araştırmalarında, amatör düzeyde koşu sporuyla ilgilenen atletlerin, antrenman ya da müsabakalarda kullandıkları koşu giysilerinde ısı, duysal, fiziksel ve estetik faktörler açısından karşılaştıkları sorunları tespit etmek amacıyla 189 katılımcıya anket uygulayarak araştırma verileri toplamışlardır. Koşu giysilerinde çeşitli konfor özelliklerinin atletler için önem dereceleri sorgulanmış olup, katılımcıların en çok önem verdikleri özellik, fiziksel rahatlık olarak tespit edilmiştir. Bu özelliği sırası ile hafiflik, dayanıklılık, vücuda uygunluk, ter emme özelliği, terin vücuttan atılması, hava geçirgenliği, çabuk kuruma, serin tutma, fonksiyonellik ve diğer özellikler izlemektedir (Çivitçi & Dengin, 2014).

Kaplan ve Okur, giysi konforunu anlamı ve öneminin Türk kullanıcıları tarafından değerlendirilmesi üzerine yaptıkları araştırmalarında, 23 farklı kumaş/giysi özelliklerinin önem derecesini değerlendirmeleri için bir anket çalışması yürütmüşlerdir. Değerlendirme sonucuna göre, konforu etkileyen en önemli beş kumaş/giysi özelliğinin: vücuda oturma oranı, terin uzaklaştırılması, ısı yalıtım, alerjik problemler ve tasarım olduğunu belirtmişlerdir (Kaplan & Okur, 2008).

Dolayısıyla konfor, insan ve çevre arasında fiziksel, psikolojik ve fizyolojik birçok faktörün etkili olduğu karmaşık bir yapı haline gelmektedir. Termofizyolojik ya da ısı konfor; deri ile tekstil yüzeyi arasındaki mekanik etkileşim sonucu oluşan ısı bir durumdur. Isı konforda belirleyici parametreler; ısı ve nem transferi, kumaşın hava geçirgenliği, ısı tutma yeteneği, statik elektriklenme eğilimi, su buharı geçirgenliği ve su emiciliğidir (Öner & Okur, 2011).

Giysi Isı Konforu ve Isı Konforu Etkileyen Parametreler

Giysi ısı konforu, derinin yüzeyindeki ve alt katmanlarındaki termoreseptörlerden gelen sinyallerin birleşiminden oluşan bir çeşit termoregülasyon sistemidir. ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) standartlarına göre ise ısı konfor, çevrenin ısı şartlarına karşı duyulan memnuniyet olarak ifade edilmiştir (Kaplan, 2009).

Termofizyolojik konfor, sıcaklık ve ıslaklık açısından konforun sağlanmasıdır, kumaşa meydana gelen ısı ve sıvı transfer mekanizmalarını kapsamaktadır (Çivitçi & Dengin, 2014). Termofizyolojik konfor açısından, vücut ile mikro klima arasındaki ısı hareketi ve vücutta oluşan sıvı ve buhar halindeki terin vücuttan uzaklaştırılması en önemli iki durumdur (Song, 2011). Bu kapsamda kumaşların konfor davranışını belirlemede temel parametreleri ısı direnç, su buharı geçirgenliği, suyun emilmesi, kuruma hızı, hava geçirgenliği ve basınç/sıkıştırma olarak belirlenmiştir (Huang, 2006). Literatür araştırmalarına dayanarak, ısı konfor indeksine etki eden parametreleri: ısı direnç, ısı emicilik, su buharı geçirgenliği, suyun emilmesi ve transferi, hava geçirgenliği olarak sıralayabiliriz. Buna ek olarak kumaş özelliklerinden bağımsız olarak: giysi tasarımı, vücutta oturma durumu ve katman sayısı, vücut ile çevre

arasındaki ısı transferinde önemli rol oynamaktadır (Matusiak & Sybilska, 2017).

Isıl Direnç

Isıl direnç, yalıtım değerinin bir ölçüsüdür ve kumaşın iki yüzü arasındaki sıcaklık farkının, birim alandan gerçekleşen ısı akışına oranı olarak tanımlanmaktadır. Giysi sisteminde kumaşın ısı transferine karşı gösterdiği direnç, kumaş materyalinin ısıl direnci, deri yüzeyi ile iç kumaş yüzeyi arasındaki hava tabakasının direnci ve iç ve dış kumaş yüzeyleri arasındaki sınır hava tabakalarının dirençlerinin toplamıdır (Öner, 2015). Isıl konfor değerlendirmesinde vücut ile giysi arasındaki değişen hava tabakası önemli bir faktördür.

Isıl Emicilik

Isıl emicilik, bir yüzey özelliği olmasından dolayı bitim işlemleriyle değişebilmektedir. Bu parametre insan derisinin tekstil materyali gibi herhangi bir objeye kısaca dokunması durumunda elde edilen soğuk ya da sıcak hissi yönünden kumaşın karakteristiğini değerlendirmede yardımcı olur. Isıl emicilik değeri düşük olan kumaşlar sıcak hissi verirken, yüksek değeri olanlar soğuk hissi verirler. Isıl emicilik, ne kumaş ve deri arasındaki sıcaklık farkına ne de ölçüm zamanına bağlı olan geçici bir parametredir. Teknik bir parametre değil fakat gerçek bir tekstil karakteristiğidir (Güney, 2008).

Su Buharı Geçirgenliği

Terleme vücut sıcaklığı yükselmeye başladığında vücudun sıcaklığını düşürmek için kullandığı bir mekanizmadır. Terleme sırasında deri yüzeyinde oluşan ter buharlaşmaktadır. Ter buharlaşırken buharlaşma ısını vücuttan sağlamakta, böylece vücutta soğuma meydana gelmektedir. Giyilen kumaşın sıvı ve buhar haldeki terin geçişine izin vermesi gerekir. Aksi halde, giysi

içindeki bağıl nem artmakta ve bu durum deride rahatsızlık veren ıslaklık hissine neden olmaktadır. Buhar ve sıvı şeklindeki terin deriden atmosfere kumaş aracılığı ile kontrollü hareketi, ısı özellikler kadar kumaşların termofizyolojik konforunu özellikle yüksek sıcaklık ve yüksek fiziksel aktivite şartlarında sağlayan önemli bir faktördür. Kumaşın buhar şeklindeki terin geçişini sağlama yeteneği su buharı geçirgenliği olarak ölçülmektedir (Gün & Bodur, 2014).

Sıvı Nem Transferi

Aktivite seviyesine bağlı olarak vücut sıcaklığı yükseldiğinde sıvı nem (ter) deri gözeneklerinden salgılanmakta ve terin buharlaşması için gerekli ısı vücuttan alındığı için deri soğumakta ve böylelikle yüksek ısı uzaklaştırılmaktadır. Terleme sırasında giysi ile deri arasında kalan mikro klima bölgesinde sıvı nem birikmesi, spor giysileri ve soğuk iklimlerde kullanılan giysiler için ciddi bir problemdir. Kumaşta optimum ısı ortamını sağlamak, nem transferini hızlı bir şekilde gerçekleştirmek, nem birikimini en aza indirmek oldukça önemlidir (Wu & Fan, 2008). Giysinin oluşan sıvı teri kılcal boşluklar vasıtasıyla hızlıca deriden emerek, geniş bir yüzey alanına yayması, etkin buharlaşmaya imkân sağlaması gerekmektedir. Dolayısıyla tekstil malzemesinin sıvı nem transfer özellikleri oldukça önem taşımaktadır.

Hava Geçirgenliği

Hava geçirgenliği, birim zamanda, birim alandan, belirli bir basınç farkında bir materyalin iki yüzeyi arasından geçen hava miktarı olarak tanımlanmaktadır. Kumaşın hava geçirgenliği, konfor özelliğini çeşitli yönlerden etkilemektedir. Bir kumaşın hava geçirgenliği, konfor özelliğini birçok şekilde etkiler. Havayı geçirgen olan bir malzeme genel olarak buhar veya sıvı fazda suyu da geçirir; bu nedenle su buharı geçirgenliği ve sıvı su iletim özelliği hava geçirgenliği ile yakından ilişkilidir. Kumaşın hava

geçirgenliğinin, kumaşın ısı direnci ile üzerindeki durağan hava tabakası arasında kuvvetli ilişki vardır ve hava tabakası kumaş hava geçirgenliğinden etkilenmektedir. Yüksek hava geçirgenliğine sahip kumaşlar, rüzgârlı ortamda konveksiyonla daha fazla ısı kaybederler (Güneşoğlu, 2005).

Giysi Isıl Konfor İndeksi

Giysi ısı konforu, genel giysi konforunu bir parçası olarak giysi tasarımında önemli bir rol oynamaktadır. Giysi ısı konforunun, ölçülebilir parametrelere bağlı farklı indekslerle tahminlenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Çalışmaların çoğu kışlık giysilerin ısı yalıtımı üzerine olup daha önce spor giysilerin ısı konforu üzerine herhangi bir çalışma yürütülmemiştir. Bu tür bir indeksin, spor giysilerin ısı konfor tahminlenmesinde daha doğru sonuçlar verebileceği düşünülmektedir. Çünkü literatürdeki indeks çalışmalarında belirlenen kumaş özelliklerinin yanı sıra giysi ve kumaş arasındaki hava tabakası da çok etkili bir parametredir ve bunun göz ardı edilip sadece kumaş parametrelerine bağlı bir indeks çok doğru bir sonuç veremeyebilir. Ancak spor giysilerinde giysinin vücudu sarması ve hava tabakasını minimuma indirmesi, giysi konforunun kumaş özelliklerine çok daha bağlı kalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kumaşın termofizyolojik özelliklerine bağlı bir ısı konfor indeksinin, spor giysinin ısı konforu hakkında çok daha iyi bir tahminlemenin yapılmasına imkan sağlayacağı düşünülmektedir.

Matusiak ve Sybilska, çalışmalarında tekstil materyallerinin ısı yalıtım ölçüm sonuçlarının, bu materyallerden yapılmış giysi ısı yalıtımını tahminlemede kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Kumaşların ısı direnç ölçümleri ile termal manken üzerindeki giysi ısı yalıtım değerlerini karşılaştırmışlardır. Farklı ısı direnç aralığına sahip dokuz farklı kumaştan aynı beden de yelek dikerek ısı manken üzerinde ısı yalıtım değerlerini hesaplamışlardır. Sonuçlar,

kumaşların ısı direnç verileri ile bu kumaşlardan yapılmış giysilerin ısıl manken üzerindeki ısı yalıtım değerleri arasında güçlü bir korelasyonun olduğunu göstermiştir. Ölçüm maliyeti, ölçüm süresi uzunluğu ve uygulama sınırlılığı nedeniyle giysi ısı yalıtım değerinin her zaman ısıl manken ile ölçülemediğini bu nedenle materyalin ısı yalıtım ölçümleri ile giysi ısı yalıtım tahminlemesinin daha verimli olacağı vurgulanmıştır (Matusiak & Sybilska, 2017)

Hes, çalışmasında kışlık montların termofizyolojik özelliklerini basit bir metotla değerlendirmiştir. Kumaşların ısı direnç (R_{ct}) ve su buharı geçirgenlik (P) değerlerini kullanarak bir kalite indeksi (IQ) oluşturmuştur.

$$IQ = (R_{ct} - R_{ct \min}) \times (P - P_{\min}) \quad (1)$$

Beş farklı kışlık montun, termofizyolojik ölçümlerini yaparak giysi konforu indeksi ile giysi fiyatı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bu tür kumaşı kesmeden, tahribatsız test sonuçlarına dayalı bir kalite indeksinin, fonksiyonel kumaş ve giysi fiyatı belirlenmesinde fikir verebileceğini belirtmiştir (Hes, 2008).

Matusiak, çalışmasında kumaşların bazı ısı özelliklerine dayanarak bir ısıl konfor indeksi (TCI) oluşturmuş.

$$TCI = \sum_{i=1}^n a_x \frac{x_i - x_{i \min}}{x_i} + \sum_{j=1}^m a_z \frac{z_{j \max} - z_j}{z_{j \max}} \quad (2)$$

x_i = artışında ısıl konforu iyileştiren özelliğin ölçüm değeri

$x_{i \min}$ = bu özelliğin ısıl konfor bakımından kabul edilebilir en düşük değeri

z_j = düşüşünde ısı konforu iyileştiren özelliğin ölçüm değeri

$z_{j\max}$ = bu özelliğin ısı konfor bakımından kabul edilebilir en yüksek değeri

a_x ve a_z özelliğin 1 ve 5 arasındaki önem derecesi olarak tanımlamıştır.

Isı konfor indeksinde, etkili olan parametreleri pozitif etki eden özellikler ve negatif etki eden özellikler olarak iki gruba ayırmıştır. Kumaş ısı ölçümlerinden edilen ısı direnç (R), ısı emicilik (b), su buharı direnci (Ret) ve hava geçirgenliği (AP) değerlerini kullanarak, dokuz farklı kumaşın 0 ve 1 arasında değişen ısı konfor indeks değerlerini elde etmiştir. Bu hesaplamada kabul edilebilir en düşük ve en yüksek değerleri, kullandığı kumaş grubu içerisindeki değerlerden tespit etmiştir. Özelliklerin 1 ve 5 arası önem derecelendirmesini kendisi belirlemiştir. Kumaşın bazı konfor özelliklerinin önem derecelerine dayalı ısı konfor indeksinin, bu kumaşlardan üretilen giysilerin ısı konfor tahminlemesinde kullanılabileceğini belirtmiştir (Matusiak, 2010).

Matusiak ve Sikorski, daha önceki çalışmasının devam olarak ısı konfor indeksini kışlık giysileri için kapalı alanlarda kullanım ([RTCI] _WI) ve açık alanlarda kullanım ([RTCI] _WO) olarak iki kısımda değerlendirmiştir. Kablosuz sıcaklık sensör ölçümleri, ısı kamera ölçümleri ve subjektif giyim denemeleri ile ısı konfor indeksinin geçerliliğini incelemiştir. Kışlık giysiler için, kumaş özelliklerinin önem derecelendirmesini yine kendisi belirlemiş olup, ısı kaybına karşı vücudun korunmasında önemli bir parametre olan ısı direnç için 5 derecesini, hava geçirgenliği özelliğini kapalı alanlar için kullanmamış, açık alanda kullanım için 3 derecesini belirlemiştir. Su buharı geçirgenliğinin yüksek aktivite durumlarından önemli olduğunu, soğuk ortamda normal giysi kullanımında terlemenin yoğun olmadığını belirterek bu özellik için

2 derecesini kullanmıştır. Isıl emiciliğin, derinin giysiye temasındaki sıcak soğuk hissi ile ilgili olduğunu ve bunun kışın ısı konforun sübjektif hissini etkilediğini belirterek bu özellik için 1 derecesini kullanmıştır. İstatistiksel sonuçlarla, ısı konfor indekslerinin ısı konfor tahminlemede doğru sonuçlar verdiğini vurgulamıştır (Matusiak & Sikorski, 2011).

Bajzik vd., çalışmalarında spor giysilerin ve iç giyimin normal kullanım şartları içerisindeki durumları için ıslak konfor indeksi (WCI) oluşturmuşlardır. On iki spor giysinin kuru ve ıslak haldeki ısı direnç ve su buharı geçirgenliklerini ölçerek, bu ölçümleri 0 ve 1 arasındaki değişen ıslak konfor indeksi için kullanmışlardır. Sonuçlara göre, en iyi spor giysinin bile 0,2 ıslak konfor indeksi değerini geçemediğini, bu düşük değerin ıslak durumdaki kumaşların ısı konfor özelliklerinin testinde özel cihazların kullanılması gerekliliğini gösterdiğini belirtmişlerdir (Bajzik vd., 2016).

Araştırma Metodolojisi

Literatür çalışmaları incelendiğinde, bu tür bir giysi ısı konfor indeksinde kullanılan ısı konfor özelliklerinin önem derecesinin, sadece yazarın düşünceleri ile belirlenmesi yerine kullanıcı değerlendirmelerinin de dikkate alınarak belirlenmesinin daha doğru olacağı düşünülmüştür. Bu çerçevede, giysi ısı özelliklerinin ne derece önemli olduğunu belirlemek için açık uçlu ve 5 dereceli skala ile likert tipi sorulardan oluşan bir anket çalışması yürütülmüştür. Anketin geliştirilmesinde uzman görüşlerinden yararlanılmıştır.

Ayrıca literatür çalışmalarında kullanılan ısı direnç, ısı emicilik, su buharı geçirgenliği ve hava geçirgenliği özelliklerine ilave olarak sıvı nem transferi özelliğinin eklenmesinin, özellikle deriye direkt temas eden spor giysiler için ısı konfor tahminlemede etkili olacağı düşünülmüştür.

Çivitçi ve Dengin, çalışmalarında yürüttükleri anket sonuçlarında, ter emme özelliği ve terin vücuttan atılması özelliklerine verilen önem derecesinin hemen hemen aynı olduğunu tespit etmiştir (Çivitçi & Dengin, 2014). Tufan vd. çalışmalarında bu özellikleri, kumaşların ter emme veya buharlaştırma özellikleri olarak tek bir başlık altında değerlendirmiştir (Turfan vd., 2016).

Literatür çalışmalarına istinaden çalışmamızda su buharı direnci ve sıvı nem transferi tek başlık altında değerlendirilmiştir. Termofizyolojik kumaş özelliklerinin derecelendirmesi için uzman görüşlerinin de dikkate alınarak hazırlanan form, 3'ü demografik özellikler, 4'ü açık uçlu ve 8'i ifadelendirilmiş kapalı uçlu olarak 3 bölümde toplam 15 sorudan oluşmaktadır. Birinci bölümde, katılımcıların demografik özelliklerini, ikinci bölümde, bu tür giysileri kullanıp kullanmadıkları, performans etkisi, teknolojik tasarımlı giysileri takip etme durumu, spor esnasında bu tür giysilerle karşılaştıkları olumsuzlukları içermektedir. Son bölümde giysinin termofizyolojik özelliklerini tanımlayan, çok önemli (5), önemli (4), orta (3), az (2) ve çok az (1) olarak derecelendirilen beşli likert tipi soru ile ölçülmüştür. Soruların ilk dördünde özelliklerin önem derecesi direkt olarak ölçülmüşken, diğer dördünde özelliklerin etkisi dolaylı olarak ölçülmüştür.

Araştırmada kullanılan ölçeğin güvenilirliğini belirlemek amacıyla Cronbach Alfa (α) istatistiğinin sonuçlarına bakılmıştır. Cronbach Alfa Katsayısının değerlendirmesinde esas alınan ölçüt, yüksek derece güvenilirliğe sahip olan $0,80 \leq \alpha < 1,00$ 'dır [18]. Yapılan Cronbach Alfa (α) istatistiğinin sonucu 0,856'dır. Bu sonuca göre araştırmada kullanılan veri toplama ölçeği için yüksek derece güvenilirlik sağlanmıştır. Araştırma sonucu soru gruplarına karşılık gelen cevapların birbirleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir ($p < 0,05$).

Araştırmanın örneklem grubu: Süleyman Demirel Üniversitesi Spor Bilimleri Fakültesinde öğrenim gören ve amatör olarak spor ile ilgilenen öğrenciler, Isparta Futbol Federasyonu Hakemleri, İstanbul Üniversitesi Spor Bilimleri Fakültesinde öğrenim gören ve amatör olarak spor ile ilgilenen öğrenciler, Macfit Spor Kulübü üyelerini içeren 218 katılımcı örneklem grubunu oluşturmuştur. Örneklem grubu, araştırmaya katılmaya gönüllü olan öğrenciler ve spor yapan kişiler arasından rastlantısal olarak seçilmiştir. Araştırmada anket yöntemi kullanılmıştır. Anket toplama işlemi tamamlandıktan sonra anket verileri, SPSS 22.0 analiz edilmiş, elde edilen veriler türlerine göre frekans ve yüzde dağılım değerleri tablolarda gösterilmiştir.

Araştırma Bulguları

Araştırmaya katılan katılımcıların demografik özellikleri:

Tablo1. Katılımcıların cinsiyet ve yaş aralığı

Cinsiyet Yaş Aralığı	Kadın	Erkek	Frekans	Yüzde
15-18	14	14	28	12,8
19-24	64	93	157	72,0
25-30	4	15	19	8,7
31-36	6	7	13	6,0
Frekans	88	129		
Yüzde	40,8	59,2		

Tablo 1’de katılımcıların cinsiyet ve yaş aralığı dağılımı gösterilmiştir.

Tablo 2. Katılımcıların sporla ilgilenme süresi

	Frekans	Yüzde (%)
0-3 yıl	30	13,8
4-7 yıl	65	29,8
8-11 yıl	79	36,2
12-15 yıl	24	11,0
16-19 yıl	19	8,7
Toplam	217	99,5

Tablo 2’de katılımcıların sporla ilgilenme süreleri gösterilmiştir.

Tablo 3: Katılımcıların spor giysi kullanma durumları

Kullanma durumu	% (f)
Kullanıyorum	%77,1 (168)
Kullanmıyorum	%22,9 (50)
Toplam	%100 (218)

Tablo 3’ de gösterilen oranlara göre katılımcıların büyük bir yüzdesinin spor giysileri kullandıkları anlaşılmaktadır.

Tablo 4: Spor giysilerin spor performansına etkisi

Performansa etkisi	% (f)
Etkisi var	%71,1 (155)
Etkisi yok	%28,9 (63)
Toplam	%100 (218)

Katılımcıların, spor giysilerin spor performansına etkisi hakkındaki düşünceleri Tablo 4’ de gösterilmiştir. Katılımcıların büyük bir yüzdesinin bu tür giysileri kullanıyor olması ve yine hemen hemen aynı oranda performansa etkisi olduğunu düşünmeleri, ürünleri bilinçli bir şekilde satın aldıkları göstermektedir. Katılımcılara performansa nasıl bir etkisi olduğu şeklinde açık uçlu bir soru da yöneltilmiş olup %17,4 (38) katılımcı

cevabı alınmıştır. Cevapların büyük kısmında, motivasyon sağlama, hareket kolaylığı sağlama, ter tutmama ve ısı etki sağlama gibi termofizyolojik özellikleri vurgulanmıştır.

Tablo 5: Teknolojik tasarımlı spor giysilerini tercih etme durumları

Tercih durumu	% (f)
Tercih ederim	%48,6 (106)
Tercih etmem	%50,9 (111)
Toplam	%100 (217)

Teknolojik tasarımlı spor giysilerin tercih edilmesi konusunda tercih etme ve etmeme oranları hemen hemen birbirine yakın çıktığı görülmektedir (Tablo 5).

Katılımcılara, spor esnasında bu tür giysilerle karşılaştıkları olumsuzluklar hakkında açık uçlu soru sorulmuştur. Cevapların en büyük yüzdesini giysinin yukarı toplaması sorunu oluşturmaktadır. Bunu, ter lekesi oluşması ve darlık genişlik düzeyinin orantısız olması takip etmektedir.

Giysinin ölçülebilir termofizyolojik konfor özelliklerinin derecelendirilmesi istenen ilk grup soru cevaplarına göre "çok önemli (5)" ve "önemli (4)" seçim yüzdeleri Tablo 6' da gösterilmiştir.

Tablo 6. Termofizyolojik konfor özelliklerinin ilk grup önem derecelendirme yüzdesi

Önem derecesi ≥ 4	%
Isıl Direnç	66,5
Isıl Emicilik	57,9
Su Buharı Direnci ve Sıvı Nem Transferi	80,1
Hava Geçirgenliği	77,8

Termofizyolojik konfor özelliklerinin direkt olarak derecelendirilmesinin istendiği soru cevaplarına göre, katılımcıların %80,1 'i su buharı direnci ve sıvı nem transferi özelliğini "önemli" (4) ve üzeri derecelendirerek en önemli parametre olarak değerlendirmişlerdir. Diğer parametreler için ise sırası ile hava geçirgenliği, ısıl direnç ve ısıl emicilik olarak değerlendirmişlerdir.

Termofizyolojik konfor özelliklerinin açıklanarak sorulan ikinci grup soru cevaplarına göre "çok önemli (5)" ve "önemli (4)" seçim yüzdeleri Tablo 8' de gösterilmiştir.

Tablo 7. Termofizyolojik konfor özelliklerinin ikinci grup önem derecelendirme yüzdesi

Önem derecesi ≥ 4	%
Isıl Direnç	69,6
Isıl Emicilik	70,5
Su Buharı Direnci ve Sıvı Nem Transferi	76,4
Hava Geçirgenliği	70,9

İkinci grup sorularda, termofizyolojik konfor özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için kısaca performansa etkisi konusunda ön bilgi verilerek önem derecelendirilmesinin yapılması istenmiştir. Bu gruptaki soru cevaplarına göre, katılımcıların %76,4 'ü ilk grup cevaplarında olduğu gibi su buharı direnci ve sıvı nem transferi özelliğini "önemli" (4) ve üzeri derecelendirerek en önemli parametre, hava geçirgenliğini ikinci önemli parametre olarak değerlendirmişlerdir. Diğer parametreler için ise ilk grup cevap sonuçlarından farklı olarak sırası ile ısıl emicilik ve ısıl direnç olarak değerlendirmişlerdir. Isıl direnç ve ısıl emicilik derecelendirme yüzdelerinin birbirinden farklı olmasına rağmen, ilk grup soru cevapları ile ikinci grup soru cevaplarına bağlı derecelendirme sırası arasında bir uyumun olduğunu görülmektedir.

Sonuç ve Öneriler

Giysilerin termofizyolojik konforunun tahminlenmesinde, kumaşların ölçülebilir parametrelerini kullanarak modelleme yapılması konusunda literatür çalışmaları sürekli devam etmektedir. Bu çalışmalarda bilimsel bakış açısının yanı sıra kullanıcı bakış açısında göz önünde bulundurulması gerektiği kanısına varılmıştır. Bu çerçevede giysi ısıl konfor indeksi çalışmalarında kullanılmak üzere, amatör düzeyde spor ile ilgilenen katılımcıların termofizyolojik konfor özelliklerini değerlendirmesini içeren bu çalışma sonucunda:

- Katılımcıların büyük bir yüzdesinin bu tür giysileri kullanıyor olması ve hemen hemen aynı oranda performans etkisi olduğunu düşünmeleri, ürünleri bilinçli bir şekilde satın aldıkları göstermektedir.

- Genç yaş grubuna hakim olan bir örneklem grubu içinde teknolojik tasarımlı spor giysilerini tercih etme ve etmeme yüzdesinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

- Katılımcılara, spor esnasında bu tür giysilerle karşılaştıkları olumsuzluklar hakkında açık uçlu soru sorulmuştur. Cevapların en büyük yüzdesini giysinin yukarı toplaması sorunu oluşturmaktadır. Bununla birlikte darlık ve genişlik oranının etkilediği görülmüş olup bu kapsamda giysi kalıplarının düzeltilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Ter lekesi konusunda kumaş özellikleri ve yüzeyi konusunda çalışmalar yapılabilir.

- Termofizyolojik konfor parametrelerine hitap eden farklı tip sorulara verilen cevapların yüzdesel farklılığından, bu parametrelerin kullanıcılar tarafından doğru olarak algılanmadığı, bu tür terimlerin anketle birlikte açıklamalı olarak sorulmasının daha sağlıklı sonuçların elde edilmesinde fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

- Termofizyolojik konfor parametrelerinin, iki farklı soru grubu ile değerlendirilmesi sonucunda, her iki grup içinde, en önemli parametre su buharı direnci ve sıvı nem transferi özelliği olup, ikinci önem sırasında hava geçirgenliği yer almıştır. İlk grup soru cevaplarına göre, diğer parametreler sırası ile ısı direnç ve ısı emicilik olurken, ikinci grup soru cevaplarına göre bu sıra tam tersi olmuştur. Ancak bu iki parametre için derecelendirme yüzdelerinin birbirine çok yakın olması ve ilk grup cevap yüzdelerini ve uzman görüşlerini de dikkate alarak genel anket verilerine göre termofizyolojik özelliklerinin kullanıcılar tarafından derecelendirmesinde su buharı direnci ve sıvı nem transferi özelliği, hava geçirgenliği, ısı direnç ve ısı emicilik olarak önem sıralaması yapılabilir.

Kaynakça

Bajzik, V., Hes, L. ve Dolezal, I. (2016). Changes in Thermal Comfort Properties of Sports Wear and Underwear due to Their Wetting, Indian Journal of Fbire and Textile Research, 41, 161-166.

Çivitci Ş. ve Dengin, S. (2014). Koşu Giysileri Konforunun Kullanıcıları Tarafından Değerlendirilmesi Üzerine Bir Araştırma, International Journal of Science Culture and Sport, Özel Sayı 1, 553-569. DOI: 10.14486/IJSCS126

Devecioğlu, S. ve Altıngül, O. (2011). Spor Teknolojilerinde İnovasyon. 6th International Advanced Technologies Symposium (LATS'11), Elazığ (16-18 Mayıs), 46-49.

Gün, A.D. ve Bodur, A. (2014). Kumaşların Su Buharı Geçirgenliği, Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt:8, No:3, 20-34.

Güneşoğlu, S. (2005). Sportif Amaçlı Giysilerin Konfor Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Güney, F. (2008). Koruyucu Giysilerde İç Konfor Şartlarının İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 49.

Hes, L. (2008). Non-Destructive Determination Of Comfort Parameters During Marketing Of Functional Garments And Clothing, Indian Journal of Fbire and Textile Research, 33, 239-245.

Huang, J. (2006). Thermal parameters for assessing thermal properties of clothing. Journal of Thermal Biology, 31, 461-466. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2006.03.001>

Kaplan S. ve Okur, A. (2008). The Meaning and Importance of clothing Comfort: A Case Study for Turkey, Journal of Sensory Studies, 23, 688-706. DOI: 10.1111/j.1745-459X.2008.00180.x

Kaplan, S. (2009). Kumaşların Mekanik Özelliklerinden ve Geçirgenlik Özelliklerinden Yararlanılarak Giysi Konforunun Tahminlenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.

Matusiak, M. (2010). Thermal Comfort Index as a Method of Assessing the Thermal Comfort of Textile Materials, Textile Research Institute, 18, 2(79), 45-50.

Matusiak, M. ve Sikorski, K. (2011). Relative Thermal Comfort Index as a Measure of the Usefulness of Fabrics for Winter Clothing Manufacturing, Textile Research Institute, 19, 6(69), 94-100.

Matusiak, M. ve Sybilska, W. (2017). Thermal resistance of fabrics vs. thermal insulation of clothing made of the fabrics, The Journal of The Textile Institute, 107, 7, 842-848. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1061789>

Öner, E. ve Okur, A. (2011). Materyal, Üretim Teknolojisi ve Kumaş Yapısının Isıl Konfora Etkileri, The Journal of Textiles and Engineer, 80, 20-29.

Öner, E. (2015). Çeşitli Liflerden Üretilen Kumaşlardan Yapılan Spor Giysilerinin Isıl Konforunun Değerlendirilmesi ve Geliştirilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 41-42.

Song, G. (2011). Improving comfort in clothing. Cambridge: The Textile Institute, CRC Press, Woodhead Publishing Limited.

Tufan, M., Özus, E.E. ve Erden, F. (2016). Futbolcu Forma ve Eşofmanlarının Kullanıcıları Tarafından Değerlendirilmesi Üzerine Bir Araştırma, International Journal of Science Culture and Sport, 4, 249-259.

Wu, H. ve Fan, J. (2008). Study Of Heat And Moisture Transfer Within Multi-Layer Clothing Assemblies Consisting Of Different Types Of Battings. International Journal of Thermal Sciences, 47, 641-647. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.04.008>

BÖLÜM 4

ÜÇ BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİLERİNİN TEKSTİL UYGULAMALARI: FDM TABANLI YAPILAR VE HİBRİT ÜRETİM YAKLAŞIMLARI

AYŞE ÖZKAL¹

Giriş

Tekstil ve moda endüstrisi, tarihsel süreç içerisinde insanlığın temel korunma ihtiyacını karşılamaktan, kültürel ifade ve estetik bir forma evrilen uzun bir yolculuk geçirmiştir. Ancak 21. yüzyılda bu sektör, benzeri görülmemiş çevresel, ekonomik ve teknolojik baskılarla karşı karşıyadır. Geleneksel üretim yöntemlerinin sınırlarına ulaşıldığı bu dönemde, Katmanlı Üretim (Additive Manufacturing - AM) veya yaygın bilinen adıyla üç boyutlu (3D) baskı teknolojileri, tekstil üretim süreçlerini, tedarik zincirini ve tasarım metodolojilerini kökten değiştirme potansiyeli taşıyan devrim niteliğinde bir yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır (Sitotaw & ark., 2020). Katmanlı Üretim, dijital 3D model verilerini kullanarak malzemeleri genellikle katman katman birleştirme işlemi olarak tanımlanır ve bu süreç, malzemeyi eksilterek (talaşlı imalat) veya

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-1294-7106

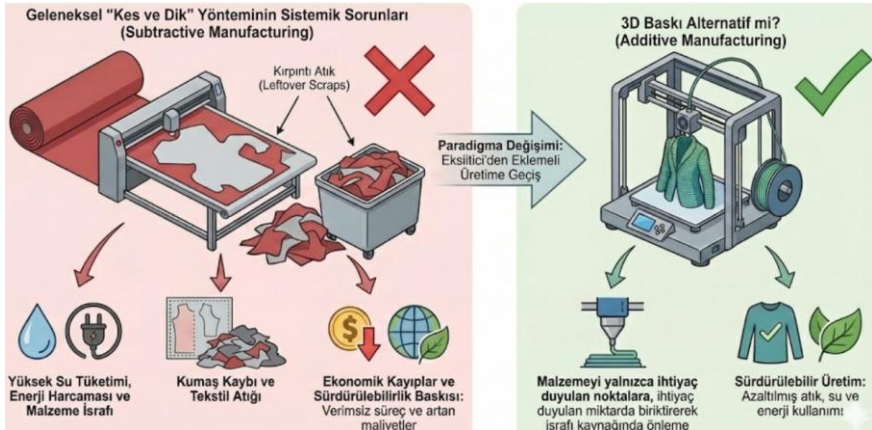
kalıplayarak şekillendiren geleneksel yöntemlerden temelden ayrılır (Jayswal & Adanur, 2022).

Tekstilde 3D baskı, yalnızca prototipleme aracı olmaktan çıkıp, karmaşık geometrilerin üretilmesine, ürünlerin kitlesel kişiselleştirilmesine (mass customization) ve tedarik zincirinin kısaltılmasına olanak tanıyan bir üretim modeline dönüşmektedir (Hossain & ark., 2024). Geleneksel tekstil üretimi, liften ipliğe, iplikten kumaşa uzanan ve milyarlarca lifin sürtünme kuvvetleriyle bir arada tutulduğu hiyerarşik ve çok aşamalı bir yapıya dayanırken (Chatterjee & Ghosh, 2020), katmanlı üretim bu süreçleri dijitalleştirerek tasarımcılara daha önce mümkün olmayan yapısal ve fonksiyonel özgürlükler sunmaktadır.

Moda Endüstrisinin Çevresel ve Ekonomik Krizleri

Moda endüstrisi, küresel ekonomideki devasa büyüklüğüne rağmen, çevre üzerindeki yıkıcı etkileri ve kaynak verimsizliği nedeniyle "sürdürülebilirlik" kavramını merkeze almak zorunda kalmıştır. Mevcut üretim modellerinin yarattığı krizler, endüstriyi NGT (Yeni Nesil Tekstiller) arayışına itmektedir. Bu yeni nesil tekstillerden biri 3D baskıdır (Şekil 1).

Şekil 1. Geleneksel Üretime Alternatif olarak 3D baskı



Şekil 1'de geleneksel üretimin sistemik sorunları görülmektedir. Mevcut tekstil üretim paradigmaları, büyük ölçüde "eksiltici üretim" (subtractive manufacturing) prensiplerine dayanmaktadır. Bu yöntemde ürünler, 2 boyutlu kumaş toplarından parçaların kesilmesi ve birleştirilmesi yoluyla elde edilir (Li, 2024). Bu süreç doğası gereği verimsizdir; çünkü kumaşın kesilmesi sırasında, giysinin kalıbına uymayan kısımlar "kırpıntı" (leftover scraps) olarak atığa ayrılır (Sitotaw & ark., 2020). 3D baskı teknolojisi ise malzemeyi yalnızca ihtiyaç duyulan noktalara, ihtiyaç duyulan miktarda biriktirerek bu israfı kaynağında önlemeyi hedefler (Dehghani & Goyal, 2022).

2,5 trilyon dolarlık bir hacme sahip olan tekstil sektörü, küresel su atığının %20'sinden sorumludur ve dünya genelinde suyun en çok kullanıldığı ikinci endüstridir (Dehghani & Goyal, 2022). Geleneksel boyama, terbiye ve yıkama süreçleri yoğun kimyasal ve su tüketimi gerektirirken; katmanlı üretim teknolojileri, "sıfır atık" stratejisine yakın bir modelle malzeme ve enerji kullanımını minimize eder. ISO 9000 gibi Kalite Yönetim Sistemleri üreticileri temiz enerjiye zorlasa da, üretim teknolojisinin kendisi değişmedikçe atık sorunu çözülememektedir (Dehghani & Goyal, 2022).

Ayrıca, tekstil ürünlerinin %85'i kullanım ömrü sonunda çöp sahalarına (landfills) gönderilmekte ve bu atıkların sadece küçük bir kısmı geri dönüştürülebilmektedir (Dehghani & Goyal, 2022). "Kes ve dik" yöntemindeki kumaş kaybı oranı, ham madde maliyetlerini artırmakta ve çevresel yükü ağırlaştırmaktadır. Katmanlı üretim, termoplastik filamentleri veya çözeltileri sadece dijital dosyadaki (CAD) koordinatlara bırakarak bu kaybı neredeyse sıfıra indirir (Li, 2024; Sitotaw & ark., 2020).

Tüm bunlarla birlikte, geleneksel üretim; envanter yönetimi, depolama, paketleme ve uzun mesafeli nakliye gibi lojistik süreçlere bağlı yüksek operasyonel maliyetler getirir. Ürünlerin satılmama

riski ve stok fazlası, ekonomik kayıpların ana kaynağıdır (Sitotaw et al., 2020). Buna karşılık, 3D baskı tabanlı tekstil üretimi, dijital veri dosyalarının transferiyle dünyanın herhangi bir yerinde "yerel üretim" (distributed manufacturing) yapılmasına olanak tanır. Bu durum, tedarik zincirini kısaltarak nakliye kaynaklı karbon ayak izini azaltır, stok tutma maliyetlerini düşürür ve "talep üzerine üretim" (on-demand) modelini mümkün kılar (Chatterjee & Ghosh, 2020; Keefe & ark., 2022).

3D YAZICI TEKNOLOJİLERİ VE TEMEL PRENSİPLERİ

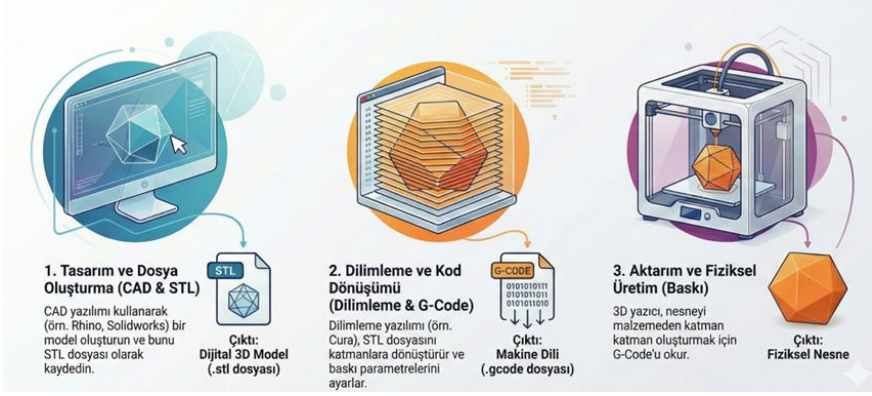
Katmanlı Üretim (AM) süreçleri, dijital bir tasarım dosyasının fiziksel bir nesneye dönüştürülmesini sağlayan ve malzemeyi katman katman (layer-by-layer) birleştirme esasına dayanan bir üretim metodolojisidir. Bu süreç, malzemelerin birleştirilerek nesnelerin yapılması işlemi olarak tanımlanır ve geleneksel eksiltici (subtractive) veya biçimlendirici (formative) üretim yöntemlerinden temelden ayrılır (Jayswal & Adanur, 2022; Manaia, Cerejo & Duarte, 2023).

A. Dijital Tasarımdan Fiziksel Nesneye Geçiş Süreci

3D baskı süreci, fiziksel üretimden önce sanal ortamda gerçekleşen bir dizi "ön işlem" (preprocessing) aşamasını içerir. Bu dijital iş akışı, tasarımın oluşturulması, dosya dönüşümü ve dilimleme (slicing) işlemlerini kapsar (Şekil 2).

- **CAD Modeli Oluşturma:** Süreç, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımları kullanılarak nesnenin 3D modelinin tasarlanmasıyla başlar. Bu aşamada, Rhino 3D gibi Karmaşık kavisli yüzeylerin modellenmesini kolaylaştıran "Non-Uniform Rational B-Spline" (NURBS) tabanlı yazılımlar veya Solidworks ve Autodesk Inventor gibi katı ve yüzey modelleme araçları kullanılır (Sitotaw & ark., 2020).

Şekil 2. Dijitalden fiziksele katmanlı üretim süreci



Şekil 2'de görülen, 3D baskı süreci işlemleri şu şekilde kısaca özetlenebilir:

• **Dilimleme ve G-Kodu:** Tasarlanan 3D model, genellikle STL (stereolithography) formatına dönüştürülerek "dilimleme" yazılımına aktarılır. Bu yazılım, dijital modeli sanal olarak yatay katmanlara ayırır ve yazıcının nozulünün izleyeceği yolu, hızını ve malzeme akışını belirleyen makine diline (G-kodu) dönüştürür (Jayswal & Adanur, 2022). Bu veriler, yazıcının malzemeyi nereye ve ne kadar bırakacağını mikron hassasiyetinde dikte eder (Goncu-Berk, Karacan & Balkis, 2020).

B. Temel Mantık ve Geleneksel Yöntemlerden Farklar

3D baskının temel mantığı, malzemenin sadece ihtiyaç duyulan bölgelere bırakılması prensibine dayanır. Bu durum, teknolojiyi geleneksel üretim yöntemlerinden ayıran en belirgin özelliktir.

• **Eksiltici Yöntemlere Kıyasla:** Geleneksel talaşlı imalat (frezeleme, tornalama, delme) yöntemleri, büyük bir malzeme bloğundan (kütükten) parçaların kesilip atılarak istenen formun elde edildiği "eksiltici" (subtractive) bir yaklaşımı benimser (Li, 2024;

Sitotaw & ark., 2020). Bu yöntemler, doğası gereği önemli miktarda atık (talaş) oluşumuna neden olur.

- **Sıfıra Yakın Atık:** Katmanlı üretimde ise malzeme, dijital modelin geometrisine göre seçici olarak biriktirilir. Destek yapıları haricinde, üretim sürecinde neredeyse hiç atık oluşmaz. Bu özellik, "sıfıra yakın atık" (near-net-shape) stratejisiyle malzeme verimliliğini maksimize eder ve üretim maliyetlerini düşürür (Dehghani & Goyal, 2022; Jayswal & Adanur, 2022).

- **Kalıpsız Üretim:** Biçimlendirici (formative) üretim yöntemleri (döküm, enjeksiyon kalıplama) pahalı kalıpların üretilmesini gerektirirken, 3D baskı herhangi bir kalıp veya ek takıma ihtiyaç duymadan doğrudan dijital dosyadan üretim yapabilir. Bu durum, karmaşık geometrilerin ve iç içe geçmiş yapıların (interlocking structures) tek seferde üretilmesine olanak tanır (Li, 2024; Manaia & ark., 2023).

Yukarıda anlatılan bu karşılaştırma Tablo 1’de özet olarak verilmiştir.

Tablo 1: Katmanlı Üretim ve Geleneksel Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırması

Özellik	Katmanlı Üretim (AM)	Geleneksel (Eksiltici/Biçimlendirici)
Malzeme Kullanımı	Ekleyerek inşa (Additive)	Keserek/Oyarak eksiltme (Subtractive)
Atık Oranı	Minimum / Sıfıra yakın	Yüksek (Talaş, kırpıntı)
Tasarım Özgürlüğü	Yüksek (Karmaşık geometriler)	Sınırlı (Takım erişimine bağlı)
Kalıp İhtiyacı	Yok (Kalıpsız üretim)	Var (Yüksek maliyetli kalıplar)
Üretim Hızı	Düşük/Orta (Prototip ve az adetli)	Yüksek (Seri üretim için)

Kaynaklar: (Jayswal & Adanur, 2022; Li, 2024; Sitotaw &., 2020)

C. Yaygın Teknolojiler ve Sınıflandırma

ASTM standartlarına göre katmanlı üretim teknolojileri yedi ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar arasında Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion), Tekne Fotopolimerizasyonu (Vat Photopolymerization), Toz Yataklı Füzyon (Powder Bed Fusion) ve Malzeme Püskürtme (Material Jetting) öne çıkmaktadır (Goncu-Berk & ark., 2020; Manaia &., 2023). Şekil 3'te bu teknolojiler görülmektedir.

Şekil 3. Yaygın olarak kullanılan katmanlı üretim teknolojileri



1. Malzeme Ekstrüzyonu: En yaygın bilinen adıyla FDM (Fused Deposition Modeling), termoplastik filamentlerin ısıtılmış bir nozül aracılığıyla eritilip katman katman dökülmesi işlemidir. Düşük maliyeti ve malzeme çeşitliliği (PLA, ABS, TPU vb.) nedeniyle tekstil uygulamalarında en sık kullanılan yöntemdir (Jayswal & Adanur, 2022; Goncu-Berk &., 2020).

2. Tekne Fotopolimerizasyonu: SLA (Stereolitografi) ve DLP (Digital Light Processing) gibi yöntemleri içerir. Sıvı haldeki fotopolimer reçinenin, UV ışık kaynağı ile katman katman kürlenerek katılaştırılması prensibine dayanır. Yüksek yüzey kalitesi ve detay hassasiyeti sunar (Chatterjee & Ghosh, 2020; Jayswal & Adanur, 2022).

3. Toz Yataklı Füzyon: SLS (Seçici Lazer Sinterleme) bu grubun en bilinen örneğidir. Toz halindeki malzemenin (genellikle naylon) lazer ile sinterlenerek katılaştırılmasını içerir. Destek yapısına ihtiyaç duymaması, karmaşık tekstil benzeri yapıların (zincirleme zırh vb.) üretimi için avantaj sağlar (Manaia & ark., 2023; Sitotaw & ark., 2020).

4. Doğrudan Mürekkep Yazma (DIW): Viskoelastik mürekkeplerin veya jellerin basınçla ekstrüde edildiği bu yöntem, özellikle iletken malzemelerin ve akıllı giyilebilir sensörlerin üretiminde kullanılmaktadır (Zhao, Liu & Liu, 2025; Chatterjee & Ghosh, 2020) (Şekil 3).

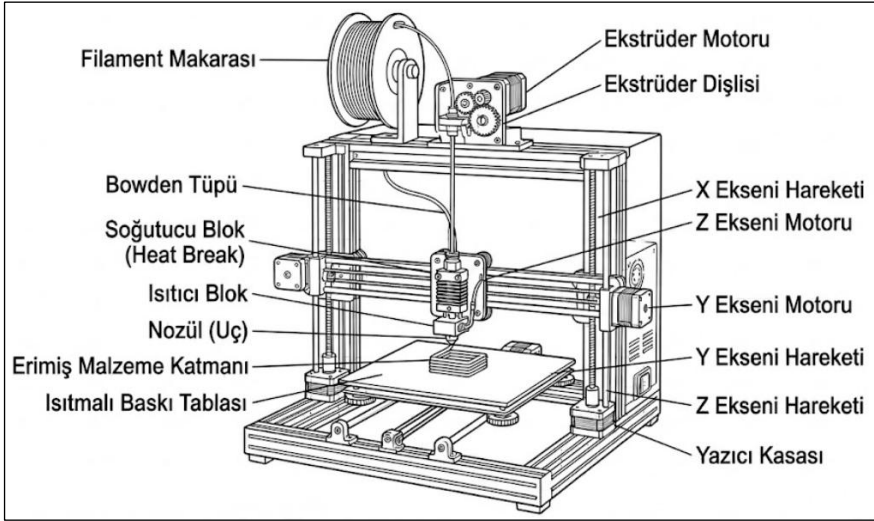
TEKSTİL VE MODA ALANINDA FDM TEKNOLOJİSİ VE MALZEMELER

Katmanlı üretim (AM) teknolojilerinin tekstil ve moda endüstrisindeki uygulamaları, yalnızca estetik prototipleme ile sınırlı kalmayıp, fonksiyonel tekstil yapılarının geliştirilmesine doğru evrilmektedir. Sektörde kullanılan AM yöntemleri arasında SLS ve DIW gibi teknikler bulunsada, tekstil ve moda tasarımında en baskın ve yaygın teknoloji Eriyik Yığma Modelleme (Fused Deposition Modeling - FDM) yöntemidir (Li, 2024; Manaia, Cerejo & Duarte, 2023).

A. FDM Teknolojisinin Yaygınlığı ve Erişilebilirliği

Şekil 4’te verilen şematik çizim, FDM (veya Fused Filament Fabrication - FFF), termoplastik polimerlerin ısıtılarak bir nozül aracılığıyla katman katman biriktirilmesi prensibine dayanan bir malzeme ekstrüzyon yöntemidir (Jayswal & Adanur, 2022).

Şekil 4. FDM tip bir 3D yazıcının şematik gösterimi



Şekil 4’te verilen FDM teknolojisinin tekstil ve moda endüstrisindeki yaygınlığı, diğer AM yöntemlerine kıyasla sunduğu belirgin avantajlara dayanmaktadır:

1. Düşük Maliyet ve Erişilebilirlik: FDM yazıcıları, SLS veya SLA gibi lazer tabanlı sistemlere göre çok daha düşük yatırım ve bakım maliyetlerine sahiptir. Masaüstü FDM yazıcılarının yaygınlaşması, bu teknolojiyi tasarımcılar, küçük işletmeler ve araştırmacılar için erişilebilir kılmıştır (Jayswal & Adanur, 2022; Li, 2024).

2. Malzeme Çeşitliliği: FDM, tekstil uygulamaları için kritik olan esnek elastomerlerden (TPU, TPE) rijit termoplastiklere (PLA, ABS) ve iletken kompozitlere kadar geniş bir malzeme yelpazesini işleyebilme yeteneğine sahiptir (Goncu-Berk, Karacan & Balkis, 2020; Jayswal & Adanur, 2022).

3. Temiz İşlem Süreci: FDM süreci, toz tabanlı sistemlerin (SLS) aksine toz kirliliği yaratmaz ve reçine tabanlı sistemler (SLA) gibi toksik kimyasalların kullanımını gerektirmez, bu da onu stüdyo

ve ofis ortamlarında kullanım için güvenli kılar (Jayswal & Adanur, 2022).

B. FDM Tip Yazıcıların Donanım Özellikleri

Tekstil uygulamalarında kullanılan FDM yazıcıları genellikle şu özelliklere göre sınıflandırılır:

- **Tek ve Çoklu Ekstrüder Sistemleri:** Bazı FDM yazıcıları (örneğin Raise3D N1), birden fazla nozüle sahip olabilir. Bu özellik, farklı renklerin veya farklı özelliklerdeki malzemelerin (örneğin sert ve esnek polimerlerin) aynı anda basılmasına olanak tanır. Çoklu malzeme yeteneği, tekstil üzerine baskı yaparken veya karmaşık moda tasarımları oluştururken büyük bir avantaj sağlar (Goncu-Berk &., 2020; Li, 2024).

- **Baskı Hacmi ve Hassasiyeti:** FDM yazıcılar, genellikle 0.1 mm toleransla üretim yapabilir. Tekstil benzeri ince yapıların üretimi için nozül çapı kritik bir parametredir; standart 0.4 mm nozüllerin yanı sıra daha ince detaylar için farklı çaplar kullanılabilir, ancak çok ince nozüllerde tıkanma riski artmaktadır (Diak & Diak, 2024; Jayswal & Adanur, 2022).

C. Tekstil Odaklı FDM Baskıda Kullanılan Malzemeler

Tekstil ve moda uygulamalarında FDM ile kullanılan malzemeler, giyilebilirlik, konfor ve dayanıklılık gereksinimlerine göre seçilmektedir. Tekstil ve moda uygulamalarında FDM ile kullanılan malzemeler, giyilebilirlik, konfor ve dayanıklılık gereksinimlerine göre seçilmektedir. En yaygın kullanılan termoplastikler Tablo 2’de özetlenmiştir.

*Tablo 2: Tekstil Odaklı FDM Baskıda Yaygın Kullanılan
Malzemelerin Özellikleri*

Malzeme	Temel Özellikler	Tekstildeki Avantajları	Dezavantajları
PLA	Biyobozunur, Rijit	Kolay basılabilir, doğal liflere iyi yapışır, çevre dostu.	Kırılgan, düşük esneklik, sert doku.
TPU / TPE	Elastomerik, Esnek	Yüksek esneklik (%550'ye varan uzama), kumaş hareketine uyum, yıkanabilir.	Basımı zor (filament bükülmesi), nem çeker (higroskopik).
ABS	Petrol bazlı, Dayanıklı	Yüksek darbe ve ısı direnci.	Baskı sırasında koku, çarpılma riski, kumaşa yapışma zorluğu.
Kompozitler	İletken veya Estetik	Fonksiyonellik (iletkenlik vb.), özel dokular.	Nozül aşınması, mekanik özelliklerde değişim.

Kaynaklar: (Jayswal & Adanur, 2022; Tümer & Erbil, 2021; Goncu-Berk & ark., 2020).

1. Polilaktik Asit (PLA): Mısır nişastası veya şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobozunur bir termoplastiktir. Düşük erime sıcaklığı (150-160°C) ve baskı sırasında zararlı gaz yaymaması nedeniyle en popüler malzemedir (Tümer & Erbil, 2021). Sert ve kırılgan yapısına rağmen (%10'dan az kopma uzaması), doğal lifli kumaşlar (yün, pamuk) üzerinde iyi yapışma gösterdiği için hibrit tekstil yapılarında ve rijit moda aksesuarlarında tercih edilir (Goncu-Berk &., 2020; Jayswal & Adanur, 2022).

2. Termoplastik Poliüretan (TPU) ve Elastomerler (TPE): Tekstil uygulamaları için en kritik malzeme grubudur. TPU, kauçuk benzeri elastikiyeti, yüksek aşınma direnci ve yırtılma mukavemeti ile bilinir. Blok kopolimer yapısı (sert ve yumuşak segmentler), malzemeye hem esneklik hem de işlenebilirlik kazandırır (Jayswal & Adanur, 2022). FDM ile basılan TPU, kumaş benzeri esneklik sağladığı ve tekstil yüzeyleri (özellikle sentetikler ve neopren) ile

güçlü bağlar kurabildiği için giyilebilir ürünlerde, ayakkabı tabanlarında ve esnek birleşimlerde standart haline gelmiştir (Lekeckas & ark., 2023; Goncu-Berk & ark., 2020). Shore sertlik değerleri (örneğin 85A, 95A), malzemenin esnekliğini belirler; daha düşük Shore değerleri daha yumuşak bir doku sunar ancak basılması daha zordur (Goncu-Berk &., 2020).

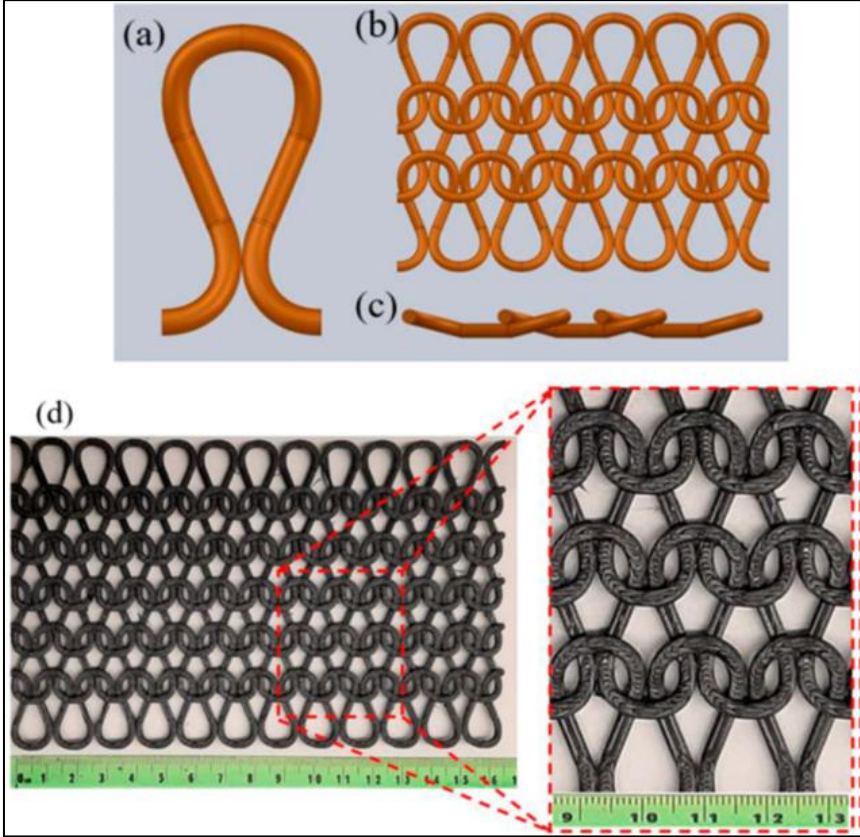
3. Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS): Petrol bazlı bu polimer, yüksek darbe dayanımı ve ısı direnci ile öne çıkar. Ancak baskı sırasında yaydığı koku ve soğuma esnasında büzülme (warping) eğilimi nedeniyle, tekstil üzerine doğrudan baskıda PLA ve TPU kadar tercih edilmez (Jayswal & Adanur, 2022).

4. Kompozit Filamentler: Fonksiyonel tekstiller için PLA veya TPU matrisine karbon nanotüp (CNT), grafen veya ahşap lifleri gibi katkıların eklenmesiyle elde edilen malzemelerdir. Bu kompozitler, tekstil ürünlerine elektriksel iletkenlik (akıllı tekstiller için), termal özellikler veya estetik dokular kazandırmak amacıyla kullanılır (Tümer & Erbil, 2021).

FDM İLE TEKSTİL BENZERİ YAPILARIN TASARIMI VE ÜRETİMİ (SADECE PLASTİK)

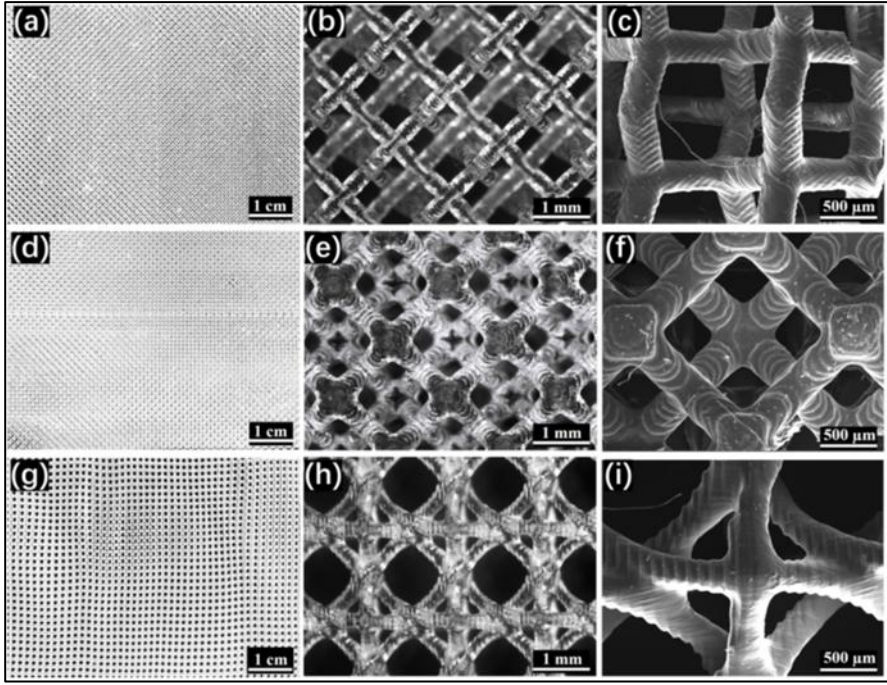
Geleneksel tekstil üretimi, liflerin bükülerek iplik haline getirilmesi ve bu ipliklerin dokuma veya örme yoluyla birbirine kenetlenmesine dayanırken; FDM teknolojisi, termoplastik polimerlerin eritilerek belirli bir yol izlemesi ve katman katman biriktirilmesi prensibiyle çalışır⁶¹. Bu temel fark, FDM ile üretilen yapıların tekstil benzeri özellikler (esneklik, dökümlülük, hava geçirgenliği) göstermesi için özel tasarım stratejilerini ve süreç kontrolünü zorunlu kılar (Diak & Diak, 2024; Chatterjee & Ghosh, 2020). Şekil 5 ve Şekil 6’da FDM tip yazıcılar ile üretilen tekstil benzeri yapılar görülmektedir.

Şekil 5. (a-c) Atkılı örme kumaş tasarımı, (d) Atkılı örme tasarımının FDM tip 3D yazıcıda üretilen numunesi



Kaynak: Jayswal & Adanur, 2022

Şekil 6. FDM tip 3D yazıcıda üretilmiş farklı yapıların gerçek (a, d, g) ve mikroskopik görüntüleri



Kaynak: Liu & ark., 2025

A. "F-Fiber" Kavramı ve İncelik Sorunu

3D baskılı yapıların tekstil hissi verebilmesi için en küçük yapı biriminin geleneksel liflere benzemesi gerekir. Diak ve Diak (2024), FDM ile ekstrüde edilen monofilamentleri tanımlamak için "F-Fiber" (Fused-Fiber) kavramını ortaya atmıştır.

Boyutsal Farklılık: Geleneksel tekstil lifleri (monofilamentler) tipik olarak 0,01 mm ila 0,05 mm (10–50 mikron) çapındayken, standart bir FDM nozülü (0,4 mm) ile üretilen F-Fiber'ların çapı genellikle 0.1 mm'nin üzerindedir. Geleneksel tekstil lifleri 10-50 mikron çapındayken, standart FDM nozülleri genellikle

400 mikron (0,4 mm) apındadır Bu boyutsal fark, kumaş benzerliğinin önündeki en büyük engeldir.

Düşük Ekstrüzyon (Under-extrusion) Tekniğı: Tekstil benzeri ince yapıların (<0,1 mm) elde edilmesi için, düşük ekstrüzyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemde, malzeme akış hızı azaltılarak, erimiş polimerin nozül hareketiyle "sündürülmesi" sağlanır ve "damla-saç kılı" (drop-hairline) etkisi yaratılır (Diak & Diak, 2024). Bu prensip, "DefeXtiles" gibi yarı-dokuma (quasi-woven) yapıların temelini oluşturur; burada periyodik polimer damlacıkları (apı ~0,5 mm) ve bunları bağlayan ince lifler (apı ~0,045 mm) esnek bir ağ oluşturur. Ancak, bu yöntemle üretilen liflerin homojenliğini sağlamak zordur ve mekanik mukavemetleri düşüktür.

B. Tekstil Benzeri Yapılar İçin Kriterler

Bir FDM ıktısının "tekstil" olarak nitelendirilebilmesi için yalnızca görsel benzerlik yeterli değildir; fonksiyonel ve duysal özelliklerin de karşılanması gerekir

Dökümlülük (Drapability): Tekstilin kendi ağırlığı altında karmaşık şekiller olarak vücuda uyum sağlama yeteneğidir. Kabir & ark. (2025), üçgen, çok açılı (multi-angular) ve sinüzoidal geometrilere sahip oksentik (Auxetic) yapıların tekstil üzerine basılmasını ve dijital görüntü işleme tekniğı ile 3D baskılı bu yapıların dökümlülüğünü incelemiş ve ağırlık arttıkça dökümlülük katsayısının (Draping Coefficient - DC) düştüğünü, yani dökümlülüğün arttığını tespit etmiştir. Çok açılı oksentik yapılar (örneğin S3, S7), dört yöne esneme kabiliyetleri sayesinde geleneksel dantel kumaşlara en yakın dökümlülüğü (%26-31 Draping Coefficient) sergilemiştir (Şekil 7).

Şekil 7. FDM tip 3D yazıcılar ile üretilen farklı oksentik (auxetic) yapıların geometrileri ve dökümlülük testindeki duruşları

	Örnek Geometrisi	Drapelenmiş Örnekler		Örnek Geometrisi	Drapelenmiş Örnekler
S-1	Üçgensel		S-8	Sinüzoidal	
S-2	Üçgensel		S-9	Dikdörtgen	
S-3	Çok Açılı		S-10	Çok Açılı	
S-4	Çok Açılı		LF-1	Dantel Kumaş	
S-5	Sinüzoidal		LF-2	Dantel Kumaş	
S-6	Sinüzoidal		LF-3	Dantel Kumaş	
S-7	Multi-angular				

Kaynak: Kabir & ark., 2025

Tekstil benzeri yapıların sahip olması gereken diğer kriterler arasında esneklik ve geri dönüş ile hava geçirgenliği sayılabilir. **Esneklik ve geri dönüş**, yapının deformasyon sonrası orijinal formuna dönebilmesidir. TPU gibi elastomerik malzemeler bu konuda avantaj sağlarken (Lekeckas & ark., 2023), PLA gibi rijit

malzemelerde geometrik tasarım esnekliği belirler (Liu &., 2025; Adanur &., 2024).

Hava Geçirgenliği (Breathability), giyilebilir ürünler için kritik bir konfor parametresidir. Liu ve arkadaşları (2025), elmas (Diamond), dodekahedron (Dodecahedron) ve sinüskare (Sinusquare) kafes yapılarının hava direncini ölçmüş; elmas yapının en düşük hava direncine (en yüksek geçirgenliğe) sahip olduğunu, ancak kalınlık arttıkça (2 mm'den 6 mm'ye) geçirgenliğin azaldığını raporlamıştır.

C. Tasarım Stratejileri ve Dolgu (Infill) Geometrisi

Zırh Benzeri (Chain Mail) Yapılar: Tarihsel zincir zırhlardan esinlenen bu yapılar, binlerce küçük, kilitli parçanın (interlocking modules) tek seferde ve montaj gerektirmeden basılmasıyla oluşturulur. Modüller birbirine fiziksel olarak bağlıdır ancak serbestçe dönebilir ve hareket edebilirler. Bu serbestlik derecesi, rijit malzemelerden (PLA, Naylon) bile dökümlü yüzeyler elde edilmesini sağlar (Manaia & ark., 2023; Sitotaw &., 2020). Örnek olarak, NASA'nın uzay uygulamaları için geliştirdiği metalik kumaşlar ve Nervous System tarafından tasarlanan "Kinematics Dress" verilebilir.

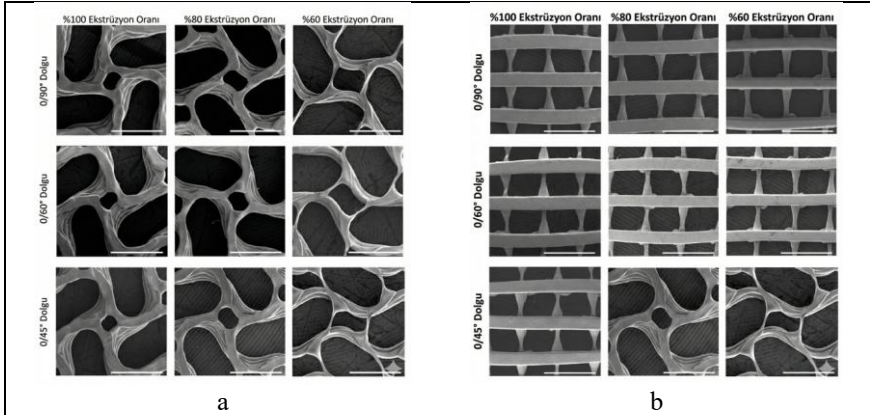
Linkli ve Mezo Yapılar: Makro ölçekli kumaş dokusunu taklit eden, birbirine geçen halkalar veya mezo ölçekli yapısal hücrelerden oluşur. Adanur & ark. (2024), Solidworks kullanarak atkı örmeciliği (weft knit) ve saç örgü (braid) yapılarını modellemiş ve FDM ile basmıştır. 3D baskılı örme yapılar, ilmeklerin birbirine geçmesiyle oluşur ve özellikle sıra (course) yönünde yüksek esneklik gösterir (Adanur & ark., 2024).

Ağ ve Kafes (Lattice) Yapıları: Kafes yapılar, periyodik birim hücrelerin tekrarıyla oluşturulan, yüksek gözenekliliğe sahip hafif yapılardır. Liu & ark. (2025), elmas (Diamond-Dm) kafes yapısının en yüksek kopma yükü (~290 N) ve uzama (~188 mm)

değerleri ile esneklik ve mukavemet dengesi sunduğunu; Dodekahedron yapısının ise en yüksek eğilme rijitliğine ve termal yalıtıma sahip olduğunu belirtmiştir.

Dolgu (Infill) Desenleri ve Ekstrüzyon Oranı: 3D baskılı tekstillerin dökümlülüğü ve elastikiyeti, iç yapı geometrisiyle kontrol edilir. Omar & ark. (2025), "Gyroid" ve "Rectilinear" (doğrusal) dolgu desenlerini incelemiştir. Gyroid desenler, sürekli eğrisel yapıları sayesinde yükü eşit dağıtarak daha izotropik bir davranış sergilerken; Rectilinear desenler %90 oryantasyonda ve %60 ekstrüzyon oranında en yüksek esnekliği ve malzeme verimliliğini (%40 tasarruf) sağlamıştır. Ayrıca, ekstrüzyon oranının %100'den %60'a düşürülmesi, lifler arasındaki boşlukları artırarak yapının bükülme direncini (bending length) %91,4 oranında azaltmış ve tekstil benzeri dökümlülüğü artırmıştır (Omar &., 2025). Bu çalışmadaki Gyroid ve Rectilinear (doğrusal) dolgu desenlerine sahip 3D baskılı tekstil yapılarının SEM görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 8. (a) Gyroid tekstiller ve (b) doğrusal tekstillere ait SEM görüntüleri (Scale bar: 2 mm)



Kaynak: Omar &., 2025

Şekil 8'deki görsel, iç yapı geometrisinin ve ekstrüzyon oranının yapısal bütünlüğe etkisini göstermektedir.

HİBRİT ÜRETİM: TEKSTİL KUMAŞLARI ÜZERİNE FDM BASKI

Katmanlı üretim teknolojilerinin tekstil endüstrisindeki en umut verici uygulamalarından biri, polimerlerin doğrudan tekstil kumaşları üzerine biriktirilmesiyle oluşturulan hibrit yapılardır. Bu yöntem, tekstil malzemelerinin konfor, esneklik ve dökümlülük gibi benzersiz özelliklerini, 3D baskılı polimerlerin yapısal rijitliği ve fonksiyonelliği ile birleştirerek yenilikçi kompozit yapıların ortaya çıkmasını sağlar (Goncu-Berk, Karacan & Balkis, 2020).

A. Süreç Tanımı ve Adhezyon Mekanizması

Tekstil üzerine FDM baskı süreci, geleneksel 3D baskı iş akışına benzerlik göstermekle birlikte, baskı platformuna bir tekstil substratının entegrasyonunu içeren kritik bir ara adıma sahiptir. Süreç; sabitleme, Z-ekseni kalibrasyonu, depozisyon (biriktirme) ve katılaşma aşamalarından oluşur.

1. Sabitleme: Tekstil kumaşı, baskı yatağı üzerine yerleştirilir. Kumaşın kaymasını veya kırışmasını önlemek için bantlar, klipsler veya özel aparatlar kullanılarak gergin ve düz bir şekilde platforma sabitlenir (Sitotaw & Kabish, 2020).

2. Z-Eksen Kalibrasyonu: Baskı nozülü ile kumaş yüzeyi arasındaki mesafe (z-offset) hassas bir şekilde ayarlanır. Bu mesafe, polimerin kumaş yüzeyinde kalması ile kumaşın içine nüfuz etmesi arasındaki dengeyi belirler (Jayswal & Adanur, 2022).

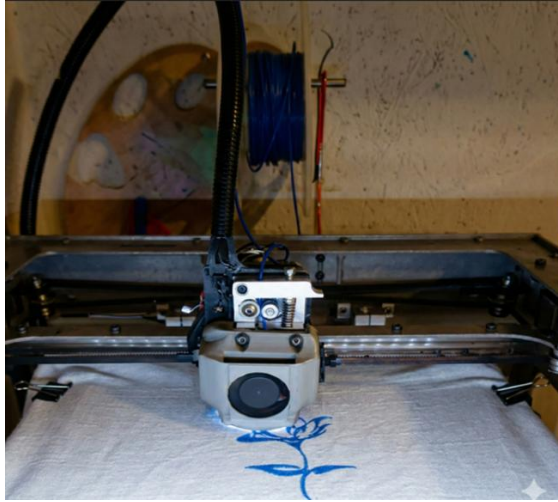
3. Depozisyon (Biriktirme): Termoplastik filament, ısıtılmış ekstrüderden geçirilerek yarı sıvı halde kumaş üzerine tabaka tabaka biriktirilir.

4. Katılaşma ve Yapışma: Erimiş polimer, kumaşın gözeneklerine nüfuz eder (penetrasyon) ve soğuyarak katılaşır. Bu

aşamada, polimer ve lifler arasında kimyasal bağlardan ziyade, "form-kilitlenme" (form-locking) veya mekanik kenetlenme adı verilen fiziksel bir bağ oluşur (Sitotaw & ark., 2020; Goncu-Berk & ark., 2020).

Şekil 9'da dokuma kumaş üzerine baskı yapan bir FDM tip yazıcının görüntüsü verilmiştir.

Şekil 9. Dokuma bir kumaş üzerine FDM tip 3D yazıcı ile baskı yapma işlemi



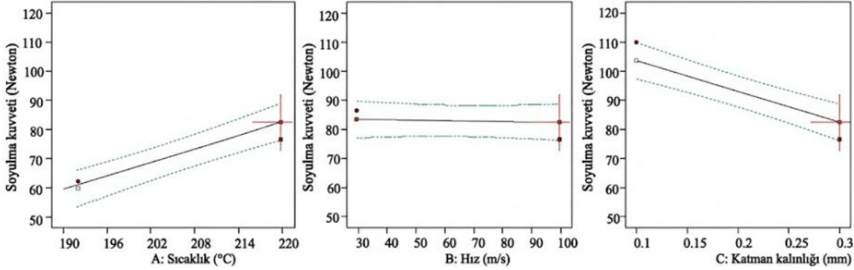
Tekstil üzerine FDM baskı süreci aşamalarında en kritik faktör, polimer ve kumaş arasındaki yapışma (adhezyon) kuvvetidir. Bu aşamada, polimer ve lifler arasında kimyasal bağlardan ziyade, "form-kilitlenme" (form-locking) veya mekanik kenetlenme adı verilen fiziksel bir bağ oluşur (Sitotaw & ark., 2020; Goncu-Berk & ark., 2020). Bu etkileşim, hassas süreç parametreleri tarafından yönetilir:

1. Baskı Sıcaklığı ve Penetrasyon: Sıcaklığın artırılması (örneğin PLA için 190°C'den 220°C'ye), polimer eriyiğinin viskozitesini düşürerek tekstil kumaşının gözeneklerine veya liflerin arasına daha derinlemesine nüfuz etmesini (penetrasyon) sağlar (Sitotaw & ark., 2025). Sitotaw & ark. (2025), nozül sıcaklığının

artmasıyla polimer makromoleküllerinin termal hareketinin arttığını ve difüzyonun kolaylaştığını, bunun da mekanik kenetlenmeyi iyileştirdiğini rapor etmiştir.

2. Baskı Hızı: Baskı hızı, polimerin soğuma süresini ve biriktirme hassasiyetini etkiler. Düşük baskı hızları (örneğin 30 mm/s), erimiş polimerin kumaş yüzeyiyle etkileşime girmesi için daha fazla zaman tanır, bu da yapışma performansını artırır (Sitotaw & ark., 2025). Aksine, yüksek hızlar (örneğin 100 mm/s), polimerin yeterince yayılmadan katılaşmasına neden olabilir ve bu durum yüzey pürüzlülüğünü artırarak, katmanlar arası bağı zayıflatır. Şekil 10'da baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığının kumaş üzerinden soyulma kuvvetine etkisi grafikler halinde verilmiştir.

Şekil 10. FDM tip 3D yazıcıda baskı sıcaklığı, hızı ve katman kalınlığının yapışma kuvveti üzerindeki etkileşimini gösteren grafikler



Kaynak: Sitotaw & ark., 2025

Şekil 10, parametrelerin sayısal etkisini somutlaştırmak için önemlidir. Özellikle baskı sıcaklığı arttıkça baskının kumaş yüzeyinden soyulma kuvveti de artmıştır. Katman kalınlığının artması ise daha düşük bir kuvvet ile soyulmaya sebep olmuştur.

3. Katman Kalınlığı ve Z-Mesafesi: Tabaka kalınlığı, dikey çözünürlüğü ve parçanın esnekliğini belirler. Daha düşük tabaka

kalınlıkları (örneğin 0,1 mm), erimiş polimerin kumaş yüzeyindeki mikro gözeneklere daha yüksek basınçla girmesine olanak tanır. Sitotaw & ark. (2025), 0,1 mm tabaka kalınlığının, 0,3 mm'ye kıyasla daha yüksek yapışma kuvveti sağladığını belirtmiştir. Ayrıca, Z-mesafesinin (nozül ile kumaş arasındaki boşluk) azaltılması (negatif ofset), nozülün erimiş polimeri kumaşın içine doğru itmesini sağlar ve fiziksel tutunmayı maksimize eder (Sitotaw & ark., 2020; Goncu-Berk & ark., 2020)

B. Malzeme ve Kumaş Uyumu

Hibrit yapıların başarısı, hem kullanılan filamentin kimyasal yapısına hem de kumaşın yüzey özelliklerine bağlıdır.

Polimer Türleri: PLA, doğal lifler (yün, pamuk) üzerinde iyi yapışma gösterir ve düşük çarpılma eğilimi nedeniyle tercih edilir; ancak sert yapısı esnek kumaşlar üzerinde delaminasyona neden olabilir (Leheckas & ark., 2023). Buna karşın TPU ve TPE, esnek yapıları sayesinde tekstil yüzeylerinin bükülme ve gerilme hareketlerine mükemmel uyum sağlarlar. Goncu-Berk & ark. (2020), TPU filamentinin polyester, poliamid ve neopren kumaşlar üzerinde en uyumlu malzeme olduğunu tespit etmiştir.

Tekstil üzerine baskı için malzeme seçilirken şu kriterler göz önünde bulundurulmalıdır:

1. Erime Sıcaklığı: Seçilen polimerin ekstrüzyon sıcaklığı, üzerine baskı yapılan kumaşın erime veya bozulma sıcaklığından düşük olmamalıdır; ancak kumaşa zarar verecek kadar da yüksek olmamalıdır (Sitotaw &., 2020).

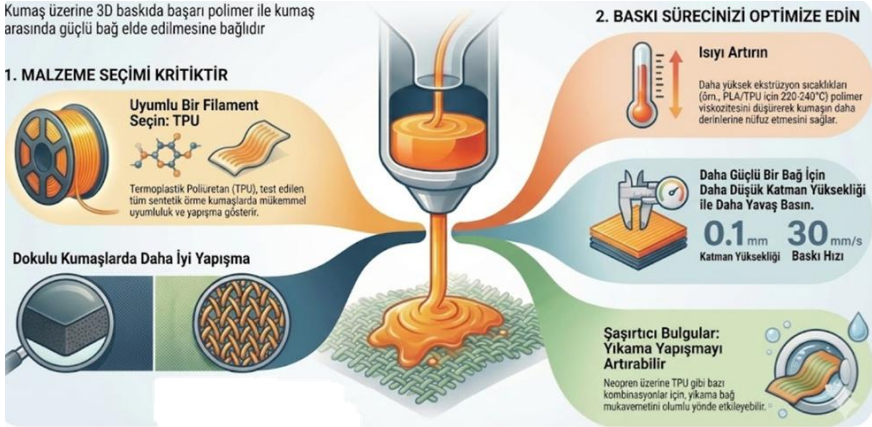
2. Esneklik (Shore Sertliği): Giyilebilir ürünlerde konfor için kumaşın dökümlülüğüne uyum sağlayacak esnek filamentler (Düşük Shore değerli TPU/TPE) tercih edilmelidir. Örneğin, 95A Shore sertliğindeki TPU, kumaşla birlikte hareket edebilirken, 83D sertliğindeki PLA rijit kalır (Goncu-Berk & ark., 2020).

3. Viskozite ve Akış: Polimerin kumaş gözeneklerine nüfuz edebilmesi için eriyik haldeki viskozitesinin yeterince düşük olması gerekir.

Kumaş Türleri: Yapışma, kumaşın yüzey pürüzlülüğü ve gözenekliliği ile doğru orantılıdır. Neopren gibi kalın ve gözenekli kumaşlar, polimerin iç yapıya daha derinlemesine nüfuz etmesine izin vererek daha güçlü bir mekanik kilitleme sağlar (Goncu-Berk & ark., 2020). Sentetik kumaşlar (Polyester, Poliamid), termoplastik polimerlerle benzer kimyasal kökene sahip olmalarına rağmen, pürüzsüz yüzeyleri nedeniyle bazen zayıf yapışma gösterebilirler. Doğal liflerin (pamuk, yün) tüylü yapısı ise mekanik tutunmayı artırabilir (Jayswal & Adanur, 2022).

FDM tip 3D yazıcılarda iyi yapışma için gereksinimler özet olarak Şekil 11’de verilmiştir.

Şekil 11. FDM tip 3D yazıcılarda iyi yapışma için gereksinimler



C. Tekstil Kumaşları Üzerine FDM Baskı (Hibrid Üretim) Uygulama Alanları

FDM ile tekstil üzerine baskı, hem estetik hem de fonksiyonel amaçlarla geniş bir yelpazede kullanılmaktadır:

- **Giyilebilir Teknolojiler ve Ortopedi:** Hastaya özel ortezler, ateller ve destekleyici yapılar üretilebilir. Örneğin, plastik bazlı kabukların tekstil ile birleştirildiği koruyucu ekipmanlar, kişiye özel geometri özgürlüğü sunar (Goncu-Berk & ark., 2020).
- **Moda ve Estetik:** Giysiler üzerine dekoratif desenler, butonlar ve bağlantı elemanları (connectors) doğrudan basılabilir. Iris van Herpen gibi tasarımcılar, bu yöntemi kullanarak geleneksel "kes ve dik" teknikleriyle mümkün olmayan formlar yaratmıştır (Goncu-Berk & ark., 2020).
- **Fonksiyonel Tekstiller:** Kaymaz tabanlar, bölgesel sertleştirme (selective stiffening) ve aşınmaya dayanıklı pedler üretilebilir (Lecekas & ark., 2023). Ayrıca, iletken filamentlerin (örneğin karbon nanotüp içeren PLA) kumaş üzerine basılmasıyla esnek devreler ve sensörler (akıllı tekstiller) elde edilmektedir (Jayswal & Adanur, 2022).

D. Ön ve Son İşlemler (Pre/Post-processing)

Sürecin başarısı sadece baskı anındaki parametrelere değil, öncesi ve sonrasındaki işlemlere de bağlıdır.

Baskı Öncesi Hazırlık: Kumaş üzerine baskı yaparken, kumaşın önceden gerdirilmesi (pre-stretching) yaygın bir tekniktir. Gerilmiş kumaş üzerine baskı yapıp serbest bırakıldığında, kumaşın geri toplama kuvveti ile polimerin direnci etkileşime girerek yapıya 3 boyutlu form kazandırır; bu "4D baskı" olarak adlandırılır (Keefe & ark., 2022). Ayrıca, kumaş yüzeyinin astar

(primer) veya PMMA gibi polimerlerle kaplanması, yapışmayı artırabilir.

Yıkama Dayanımı ve Son İşlemler: Yıkama işlemi genellikle mekanik stres ve deterjan etkisiyle polimer-kumaş bağıını zayıflatır. Ancak, şaşırtıcı bir şekilde, Goncu-Berk & ark. (2020), TPU baskılı neopren numunelerde yıkama sonrasında yapışma kuvvetinin arttığını rapor etmiştir. Bu durum, yıkamanın kumaş üzerindeki hidrofobik kaplamaları uzaklaştırarak veya yüzeyin pürüzlenmesi nedeniyle polimerin kumaş içine daha iyi oturmasını sağlayarak gerçekleşmiş olabilir.

ZORLUKLAR, SINIRLAMALAR VE ENGELLER

Katmanlı üretim (AM) teknolojileri, tekstil ve moda endüstrisinde tasarım özgürlüğü ve kişiselleştirme gibi devrim niteliğinde fırsatlar sunsa da, bu teknolojilerin geleneksel tekstil üretim yöntemlerinin yerini tamamen alabilmesi veya endüstriyel ölçekte yaygınlaşabilmesi için aşılması gereken ciddi engeller bulunmaktadır. Bu zorluklar teknik süreçlerden malzeme kimyasına, ekonomik sürdürülebilirlikten tüketici algısına kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır.

A. Teknik Zorluklar

Tekstil tabanlı AM uygulamalarında karşılaşılan teknik zorluklar, genellikle yazıcı donanımlarının sınırları, süreç parametrelerinin hassasiyeti ve nihai ürünün kalite standartlarıyla ilgilidir.

Uzun Baskı Süreleri ve Üretim Hızı:

Geleneksel tekstil üretim süreçleri (dokuma, örme, nonwoven) yüksek hızlı ve seri üretime uygunken, katmanlı üretim teknolojileri doğası gereği daha yavaştır. Özellikle FDM (Eriyik

Yığılma Modelleme) ve SLA (Stereolitografi) gibi yöntemlerde, nesnenin katman katman inşa edilmesi işlemi, üretim süresini önemli ölçüde uzatmaktadır (Sitotaw & ark., 2020). Örneğin, karmaşık bir zincirleme zırh (chainmail) yapısının veya bir giysinin tamamının basılması, tasarıma bağlı olarak saatler hatta günler sürebilmektedir (Li, 2024). Bu durum, kitlesel üretim (mass production) açısından AM teknolojilerini dezavantajlı konuma getirmektedir. Ancak, CLIP (Continuous Liquid Interface Production) gibi yeni nesil teknolojiler, reçine kürlenme hızını artırarak bu süreyi kısaltmayı hedeflese de, tekstil uygulamaları için hala geliştirilmesi gereken bir alandır (Manaia, Cerejo & Duarte, 2023).

Kalibrasyon ve İşletme Zorlukları:

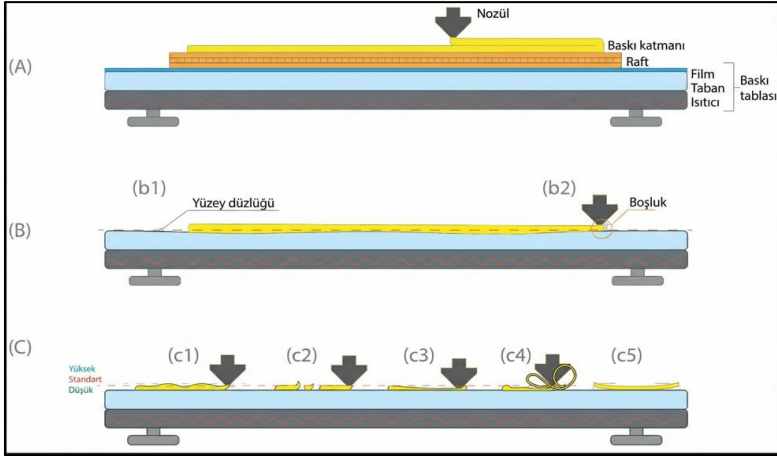
Tekstil üzerine baskı (hibrit yapılar) veya tekstil benzeri ince yapıların üretimi, standart 3D baskı işlemlerine göre çok daha hassas kalibrasyon gerektirir.

- **Nozül ve Yatak Kalibrasyonu:** Nozül ile baskı yatağı (veya kumaş yüzeyi) arasındaki mesafe (Z-offset), baskının başarısı için en kritik faktördür. Eğer mesafe çok fazlaysa, polimer kumaşa yeterince nüfuz edemez ve yapışma (adhezyon) gerçekleşmez; mesafe çok azsa, nozül kumaşı yırtabilir veya erimiş polimer akışı bloke edilerek nozülün tıkanmasına (clogging) neden olabilir (Diak & Diak, 2024).

- **Kumaş Stabilizasyonu:** Kumaş üzerine baskı yapılırken, kumaşın baskı yatağına sabitlenmesi zorunludur. Baskı sırasında kumaşın kayması veya esnemesi, katmanların hizalanmamasına ve baskı hatasına yol açar (Goncu-Berk & ark., 2020).

- **Filament Besleme Sorunları:** Özellikle tekstil uygulamalarında tercih edilen TPU gibi esnek filamentlerin (Shore değeri düşük) ekstrüder dişlileri arasında bükülmesi (buckling) veya sıkışması yaygın bir işletme sorunudur (Diak & Diak, 2024).

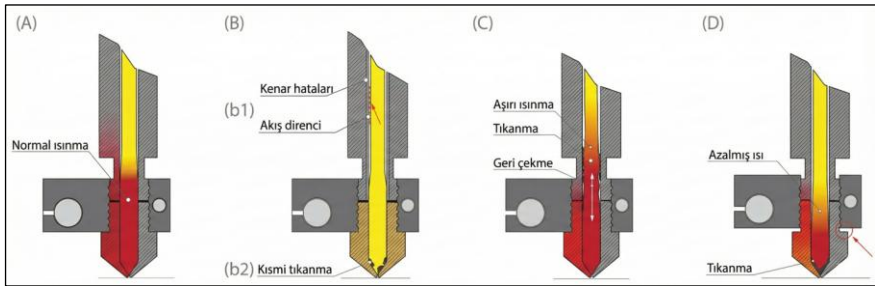
Şekil 12. FDM tip 3D yazıcılar ile üretimde karşılaşılabilecek baskı tablası ve nozul ayarı kaynaklı sorunlar



(A) açıklayıcı gösterim, (B) baskı tablası düzlüğü, (C) nozul konumuna bağlı olarak ortaya çıkan baskı problemleri: (c1) f-lif genişliği ve yüksekliğinde belirgin düzensizlikler; (c2) f-lifin baskı sırasında kopması; (c3) f-lifin baskı tablasına aşırı bastırılması sonucu yayılması ve tabladan ayrılmasının zorlaşması; (c4) ekstrüzyonun kısmen veya tamamen havada gerçekleşmesiyle oluşan “spagetti” etkisi ve buna bağlı nozulda malzeme birikimi; (c5) baskı sırasında oluşan eğilme (warping) problemi

Kaynak: Diak & Diak, 2024

Şekil 13. FDM tip 3D yazıcılar ile üretimde karşılaşılabilecek baskı kafası kaynaklı sorunlar



(A) normal ekstrüzyon, (B) duvar yüzeyindeki kusurlar, (C) aşırı ısınma, (D) nozulun hatalı montajı/teması problemi

Kaynak: Diak & Diak, 2024

Yüzey Kalitesi Sınırlamaları:

FDM teknolojisi ile üretilen parçalarda, katmanlı yapının doğası gereği "stair-stepping" (merdiven basamağı) etkisi görülür. Bu durum, tekstil ürünlerinde beklenen pürüzsüz ve estetik yüzey kalitesine ulaşmayı zorlaştırır ve dokunsal konforu olumsuz etkileyebilir (Jayswal & Adanur, 2022). Ayrıca, geleneksel tekstil lifleri mikron seviyesinde (10-50 μm) inceliğe sahipken, standart FDM nozülleri ile üretilen liflerin çapı genellikle 100 μm 'nin üzerindedir. Daha ince nozüllerin kullanılması mümkün olsa da, bu durum tıkanma riskini artırır ve üretim süresini daha da uzatır (Diak & Diak, 2024).

B. Malzeme Sınırlamaları

Mevcut 3D baskı malzemeleri, geleneksel tekstil liflerinin sunduğu konfor ve performans özelliklerini tam olarak karşılamakta yetersiz kalmaktadır.

- **Konfor ve Dökümlülük:** PLA ve ABS gibi yaygın termoplastikler, tekstil uygulamaları için fazla sert ve rijittir. Bu malzemelerle üretilen giysiler veya kumaşlar, vücut hareketlerine uyum sağlamada zorlanır ve "plastik" hissi verir (Chatterjee & Ghosh, 2020; Leveckas & ark., 2023). TPU gibi esnek malzemeler dökümlülüğü artırsa da, pamuk veya ipek gibi doğal liflerin sunduğu nefes alabilirlik ve nem yönetimi (moisture wicking) özelliklerinden yoksundur (Hossain & ark., 2024).

- **Yıkanabilirlik ve Dayanıklılık:** 3D baskılı tekstillerin veya hibrit yapıların, tekrarlı yıkama ve kurutma döngülerine dayanması gerekir. Ancak, polimer ile kumaş arasındaki mekanik bağ (form-locking), yıkama sırasındaki mekanik stresler ve deterjan etkisiyle zayıflayabilir ve delaminasyona (katman ayrılmasına) yol açabilir (Keefe & ark., 2022).

- **Malzeme Çeşitliliği:** Fotopolimer reçineler (SLA/DLP için) genellikle kırılmalıdır ve ciltle temasında biyouyumluluk sorunları yaratabilir (Chatterjee & Ghosh, 2020). Ayrıca, iletken mürekkeplerin veya kompozitlerin iletkenlik seviyeleri, metalik tellere kıyasla hala düşüktür ve esneme altında direnç değişimleri gösterebilir.

C. Ekonomik Zorluklar

Yeni nesil tekstillerin (NGT) ve 3D baskı entegrasyonunun geliştirilmesi ve uygulanması, yüksek araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) maliyetleri getirmektedir.

- **Yüksek Başlangıç ve İşletme Maliyetleri:** Özelleştirilmiş 3D yazıcıların, mikro-dağıtım (micro-dispensing) sistemlerinin ve özel malzemelerin (örneğin iletken mürekkepler veya nano-kompozitler) temini pahalıdır (Hossain & ark., 2024).

- **Ölçeklenebilirlik:** Küçük ölçekli prototiplemeden seri üretime geçiş, ekonomik açıdan zordur. Geleneksel tekstil üretimi, yüksek hacimlerde düşük maliyet sunarken; 3D baskı, düşük hacimlerde maliyet avantajı sağlasa da, üretim adedi arttıkça maliyet ve zaman açısından dezavantajlı hale gelebilir (Hossain & ark., 2024; Sitotaw & ark., 2020).

D. Tasarım Eğitimi ve Tüketici Kabulü

Tekstil ve moda endüstrisinde 3D baskının benimsenmesi, sadece teknolojik değil, aynı zamanda kültürel ve eğitsel bir dönüşümü de gerektirir.

- **Disiplinlerarası Bilgi Gereksinimi:** 3D baskılı tekstillerin tasarımı; malzeme bilimi, CAD modelleme, tekstil mühendisliği ve 3D yazıcı donanım bilgisini içeren yüksek düzeyde bir uzmanlık gerektirir. Basit bir yapının basılması bile çeşitli yazılım paketlerine ve teknik parametrelere hakim olmayı zorunlu kılar (Diak & Diak, 2024).

- **Tüketici Algısı:** Tüketiciler, 3D baskılı giysilerin konforu, estetiği ve güvenliği konusunda tereddüt yaşayabilirler. Özellikle giyilebilir teknolojilerde, elektronik bileşenlerin entegrasyonu ile ilgili güvenlik endişeleri ve ürünün "geleneksel tekstil hissini" vermemesi, kabulü zorlaştıran faktörlerdir (Hossain & ark., 2024).

- **Fikri Mülkiyet Sorunları:** Mevcut tasarımların taranarak (3D scanning) ve 3D baskı ile kopyalanarak çoğaltılabilmesi, telif hakları ve marka koruması açısından sektörde endişe yaratmaktadır (Sitotaw & ark., 2020).

ARAŞTIRMA BOŞLUKLARI VE GELECEK YÖNELİMLERİ

Katmanlı üretim (AM) teknolojileri, tekstil ve moda endüstrisinde tasarım özgürlüğü, kişiselleştirme ve tedarik zinciri verimliliği açısından önemli bir potansiyel sunmasına rağmen, teknolojinin mevcut durumu ile endüstriyel beklentiler arasında hala önemli boşluklar bulunmaktadır. Literatür taraması ve mevcut uygulamaların analizi, bu teknolojinin laboratuvar ortamındaki prototipleme aşamasından kitlesel üretime geçebilmesi için aşılması gereken kritik araştırma alanlarını ve gelecekteki gelişim rotalarını ortaya koymaktadır.

A. Mevcut Araştırma Boşlukları

Mevcut literatürde yapılan çalışmaların çoğu, konsept kanıtlama (proof-of-concept) ve prototip geliştirme aşamasında yoğunlaşmıştır. Ancak, malzemenin davranışı, süreç standardizasyonu ve sürdürülebilirlik konularında derinlemesine araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

- **Gerçek Tekstil Özelliklerinin Taklidi ve Lif Oluşumu:** Mevcut FDM ve benzeri AM yöntemleri, genellikle sürekli bir polimer bloğu veya kalın filamentler (0,1 mm üzeri) üretmektedir.

Ancak geleneksel tekstiller, mikron seviyesindeki liflerin hiyerarşik montajına (lif-iplik-kumaş) dayanır. Chatterjee ve Ghosh (2020), mevcut 3D baskı yöntemlerinin, lif oluşumu sırasında meydana gelen akış kaynaklı kristalleşme ve moleküler oryantasyonu sağlayamadığını, bu nedenle gerçek tekstil mukavemeti ve esnekliğine ulaşamadığını vurgulamaktadır. Diak ve Diak (2024) ise standart nozüllerle 0.1 mm'den daha ince ve homojen monofilamentlerin ("F-Fiber") üretilmesinin zorluğunu ve bu alandaki teknolojik yetersizliği bir araştırma boşluğu olarak tanımlamaktadır.

- **Malzeme Çeşitliliği ve Uyumluluğu:** Mevcut FDM malzemeleri (PLA, ABS, TPU) sınırlıdır ve geleneksel tekstillerin dokunsal konforunu (yumuşaklık, nem yönetimi) sağlamakta yetersiz kalmaktadır (Li, 2024). Jayswal ve Adanur (2022), basılan kumaşların mekanik özellikleri üzerine detaylı çalışmaların eksik olduğunu ve yeni malzeme kombinasyonlarının geliştirilmesi gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca, biyouyumlu ve cilt dostu malzemelerin çeşitliliği sınırlıdır ve mevcut iletken malzemelerin performansları yıkama ve aşınma ile düşmektedir (Zhao, Liu & Liu, 2025).

- **Adhezyon Mekanizmalarının Standardizasyonu:** Tekstil üzerine baskı uygulamalarında, polimer ile kumaş arasındaki yapışma (adhezyon) kritik bir sorundur. Goncu-Berk, Karacan ve Balkis (2020), farklı kumaş yapıları ve polimer kombinasyonları için yapışma parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini, ancak bu alanda standartlaştırılmış test protokollerinin (örneğin yıkama sonrası dayanım testlerinin tekrarlanabilirliği) eksik olduğunu belirtmektedir. Yıkama, terleme ve mekanik aşınma gibi gerçek kullanım koşullarının simülasyonu üzerine daha fazla uzun vadeli çalışmaya ihtiyaç vardır (Leheckas & ark., 2023).

- **Süreç Parametrelerinin Kapsamlı Analizi:** Yazıcı parametrelerinin (sıcaklık, hız, katman kalınlığı) kumaş özellikleri

üzerindeki etkileri incelenmiş olsa da, bu parametrelerin birbirleriyle olan karmaşık etkileşimleri ve farklı kumaş yapıları (örneğin farklı örgü desenleri) üzerindeki etkileri tam olarak haritalandırılmamıştır (Sitotaw & ark., 2025).

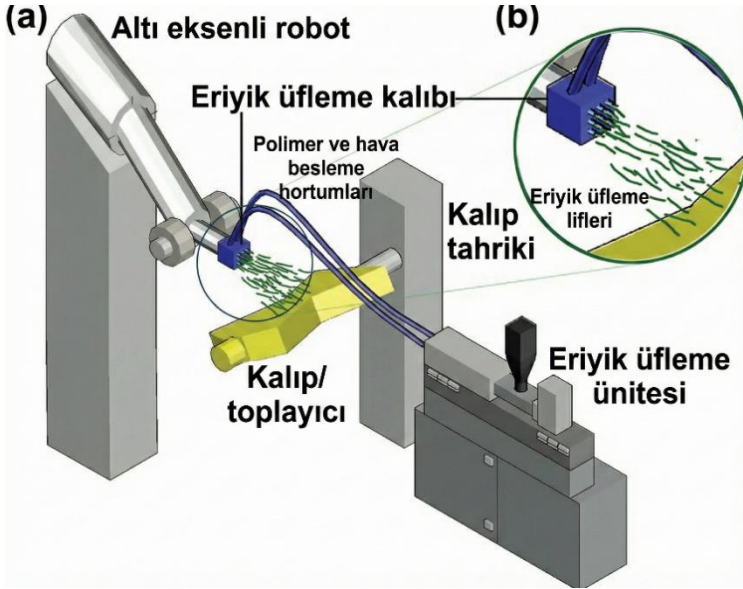
B. Gelecek Yönelimleri ve Teknolojik Vizyon

Tekstil ve moda endüstrisinde katmanlı üretimin geleceği, disiplinlerarası yaklaşımların entegrasyonu ve yeni üretim paradigmalarının benimsenmesiyle şekillenecektir.

"Liflerle Baskı" (Printing with Fibers-PWF) Paradigması:

Geleneksel 3D baskının ötesine geçerek, polimer damlacıkları yerine doğrudan liflerin üretilip yönlendirildiği sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Chatterjee ve Ghosh (2020), "Liflerle Baskı" (PWF) konseptini, lif oluşumunu ve dağıtımını (dispensing) birleştiren, robotik kontrol sistemleriyle entegre edilmiş bir gelecek vizyonu olarak sunmaktadır. Bu yaklaşım, eriyik üfleme (meltblowing) veya elektro-eğirme (electrospinning) benzeri yöntemlerle liflerin anlık olarak üretilip, 3 boyutlu bir kalıp üzerine kontrollü bir şekilde yerleştirilmesini ve böylece dikişsiz, gerçek tekstil özelliklerine sahip giysilerin üretilmesini hedeflemektedir. Liflerle baskı ile ilgili bir görsel Şekil 14'te verilmiştir.

*Şekil 14. Geleceğin üretim paradigmalarından olacağı varsayılan
Liflerle Baskı*



Kaynak: Chatterjee & Ghosh, 2020

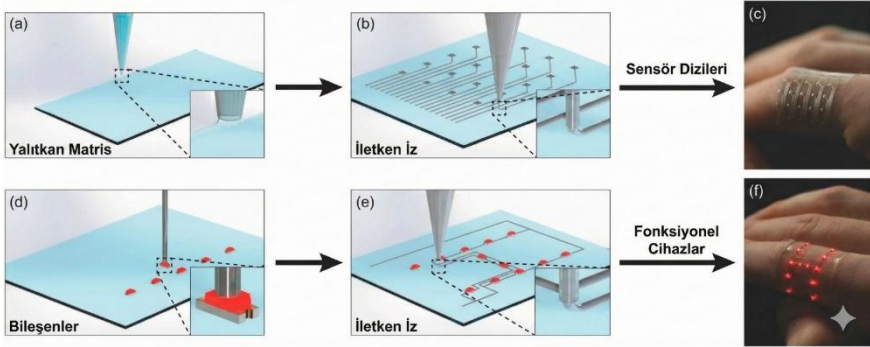
Şekil 14'te Chatterjee ve Ghosh (2020) tarafından önerilen yöntemde polimer damlacıkları yerine doğrudan liflerin üretilip 3D kalıplar üzerine robotik sistemlerle işlendiği gelecek vizyonu özetlenmektedir. Burada bir robot kol eriyik üfleme (meltblowing) kalıbını yönlendirerek manken üzerine dikişsiz bir giysi formunda lif püskürtmektedir.

Hibrit ve Çoklu Süreç Üretimi:

Tek bir AM teknolojisinin tüm ihtiyaçları karşılaması zor olduğundan, gelecekte hibrit sistemlerin yaygınlaşması beklenmektedir. Jayswal ve Adanur (2022), FDM ile Doğrudan Mürekkep Yazma (DIW) yöntemlerinin kombinasyonunun, hem yapısal bütünlük hem de elektronik fonksiyonellik (sensörler, devreler) açısından büyük potansiyel taşıdığını belirtmektedir.

Ayrıca, 3D baskının geleneksel tekstil üretim yöntemleriyle (dokuma, örme) entegre edildiği hibrit üretim hatları, ölçeklenebilirlik sorununa çözüm olabilir (Hossain & ark., 2024).

Şekil 15. Hibrit 3D baskı sürecini gösteren şema. (a) Yalıtkan mürekkep ile baskı, (b) iletken mürekkep ile baskı, (d) vakumlu nozül ile bileşen yerleştirme ve (f) parmağa takılan fonksiyonel bir LED cihazı



Kaynak: Jayswal & Adanur, 2022

Bu şekil, hem iletken mürekkeplerin (DIW) hem de elektronik bileşenlerin (Pick-and-Piece) nasıl bir araya getirilerek "giyilebilir" bir sistem oluşturulduğunu gösterir (Şekil 15).

Akıllı Tekstiller ve 4D Baskı:

Geleceğin tekstilleri sadece giyinmek için değil, veri toplamak ve çevreyle etkileşime girmek için de kullanılacaktır. Zhao ve arkadaşları (2025), DIW yöntemiyle üretilen iletken kumaşların, hareket algılama ve sağlık izleme sensörleri olarak kullanımının artacağını öngörmektedir. Buna ek olarak, 4D baskı teknolojisiyle üretilen, ısı, nem veya ışık gibi uyarılarla şekil değiştirebilen akıllı giysiler (örneğin, vücut ısısına göre gözenekleri açılıp kapanan kumaşlar), kişiselleştirilmiş termal konfor ve fonksiyonellik sunacaktır (Sitotaw & ark., 2020; Manaia, Cerejo & Duarte, 2023).

Şekil 16’da, 4D baskı ve akıllı tekstiller görselleştirilmiştir. "Zaman" boyutunun tasarıma nasıl eklendiğini ve ürünün sonradan nasıl form değiştirebildiğini renkli ve estetik bir örnekle sunar (Sitotaw & ark., 2020).

Şekil 16. 4D Baskı ve Şekil Değiştiren Yapılar



Kaynak: Sitotaw & ark., 2020

Şekil 16’da verilen görsel, renkli 4D baskılı bir elbise örneğidir. Bu görsel, statik bir baskının ötesinde, zamanla veya dış uyaranla değişebilen estetik ve fonksiyonel potansiyeli temsil eder.

Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Tasarım:

Çevresel kaygılar, malzeme ve süreç geliştirmelerinde ana itici güç olmaya devam edecektir. Gelecek araştırmalar, petrol bazlı polimerler yerine, biyobozunur (PLA gibi) ve geri dönüştürülebilir

malzemelerin geliştirilmesine odaklanacaktır (Tümer & Erbil, 2021). Lekeckas & ark. (2023), döngüsel tasarım ilkeleri çerçevesinde, ürünün kullanım ömrü sonunda 3D baskılı parçaların kumaştan ayrılarak geri dönüştürülebilir olmasını sağlayan tasarımların önem kazanacağını vurgulamaktadır. Ayrıca, Hossain & ark. (2024), üretim süreçlerinde enerji tüketimini azaltan ve atık yönetimini optimize eden "Açık İnovasyon" (Open Innovation) stratejilerinin benimsenmesini önermektedir.

Yapay Zeka ve Dijitalleşme:

Tasarım ve üretim süreçlerinin optimizasyonunda Yapay Zeka (AI) ve Makine Öğrenimi (ML) entegrasyonu kritik bir rol oynayacaktır. Li (2024), AI destekli tasarım araçlarının ve IoT (Nesnelerin İnterneti) entegrasyonunun, kişiye özel üretim süreçlerini hızlandıracak ve hata oranlarını düşüreceğini belirtmektedir. Dijital vücut tarama verilerinin doğrudan üretim parametrelerine dönüştürüldüğü tam otomatik sistemler, "talep üzerine üretim" modelini standart hale getirebilir (Hossain & ark., 2024).

Sonuç olarak, katmanlı üretim teknolojilerinin tekstil endüstrisindeki tam potansiyeline ulaşması; malzeme bilimindeki yenilikler, yazıcı teknolojilerindeki hassasiyet artışı ve sürdürülebilir üretim modellerinin entegrasyonu ile mümkün olacaktır. Bu dönüşüm, sadece üretim yöntemlerini değil, aynı zamanda tüketim alışkanlıklarını ve moda endüstrisinin çevresel ayak izini de kökten değiştirme potansiyeline sahiptir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, katmanlı üretim (Additive Manufacturing – AM) teknolojilerinin tekstil ve moda endüstrisindeki mevcut durumu, özellikle FDM tabanlı üretim yaklaşımları odağında

kapsamlı bir literatür senteziyle ele alınmıştır. Geleneksel tekstil üretim yöntemlerinin yüksek kaynak tüketimi, atık oluşumu ve sınırlı kişiselleştirme kapasitesi gibi yapısal sorunları karşısında, 3D baskı teknolojilerinin sunduğu dijitalleşme, tasarım özgürlüğü ve talep üzerine üretim olanaklarının sektöre önemli bir dönüşüm potansiyeli sunduğu görülmektedir.

İncelenen çalışmalar, FDM teknolojisinin tekstil ve moda alanında en yaygın kullanılan AM yöntemi olduğunu, bunun temel nedenlerinin düşük maliyet, malzeme çeşitliliği ve erişilebilirlik olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, mevcut FDM sistemlerinin lif inceliği, yüzey kalitesi, dökümlülük ve nefes alabilirlik gibi tekstile özgü performans kriterlerini tam anlamıyla karşılamakta yetersiz kaldığı açıkça görülmektedir. Literatürde tanımlanan “F-fiber” kavramı, bu teknolojik sınırlamaları nicel olarak ortaya koymakta ve FDM ile üretilen yapıların geleneksel tekstil lifleriyle ölçek ve davranış açısından önemli farklar taşıdığını göstermektedir.

Çalışmada ayrıca, tekstil kumaşları üzerine doğrudan FDM baskı yoluyla elde edilen hibrit yapıların, katmanlı üretimin endüstriyel uygulanabilirliği açısından en umut verici alanlardan biri olduğu belirlenmiştir. Polimer-kumaş etkileşiminin büyük ölçüde mekanik kilitlenmeye dayandığı, bu nedenle baskı sıcaklığı, hız, tabaka kalınlığı ve Z-ofset gibi süreç parametrelerinin yapışma performansı üzerinde belirleyici rol oynadığı vurgulanmıştır. Ancak, literatürde farklı kumaş türleri ve malzeme kombinasyonları için standartlaştırılmış test protokollerinin bulunmaması, sonuçların karşılaştırılabilirliğini sınırlayan önemli bir eksiklik olarak öne çıkmaktadır.

Tekstil benzeri yapıların tasarımında kullanılan kafes, oksentik ve zincirleme (chain-mail) geometrilerin, rijit polimerlerle dahi dökümlülük ve çok eksenli esneklik sağlayabildiği; buna karşın bu yapıların üretim süreleri, mekanik dayanımları ve kullanıcı

konforu açısından hâlen optimize edilmesi gerektiği görülmektedir. Ayrıca, sürdürülebilirlik bağlamında biyobozunur ve geri dönüştürülebilir malzemelerin (özellikle PLA ve türevleri) potansiyel sunduğu, ancak uzun vadeli kullanım, yıkama dayanımı ve döngüsel tasarım açısından yeterli veri bulunmadığı tespit edilmiştir.

Öneriler

Bu derlemenin ortaya koyduğu bulgular doğrultusunda, gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki öneriler geliştirilebilir:

Lif-odaklı üretim yaklaşımları: Mevcut FDM tabanlı damlacık ve filament biriktirme mantığının ötesine geçilerek, mikron ölçekli lif üretimini ve yönlendirilmesini mümkün kılan “liflerle baskı” (Printing with Fibers) paradigmalarına odaklanılmalıdır.

Standartlaştırılmış test protokolleri: 3D baskılı tekstiller ve hibrit yapılar için dökümlülük, hava geçirgenliği, yıkama dayanımı ve adhezyon gibi performans kriterlerini kapsayan, tekstil odaklı standart test yöntemleri geliştirilmelidir.

Malzeme geliştirme: Geleneksel tekstil liflerinin sunduğu konfor özelliklerini taklit edebilen, esnek, nefes alabilir ve biyoyoumlu yeni filament ve mürekkep sistemlerinin geliştirilmesi teşvik edilmelidir.

Hibrit ve çoklu süreç entegrasyonu: FDM, DIW ve geleneksel tekstil üretim yöntemlerinin entegre edildiği hibrit üretim hatları, hem fonksiyonellik hem de ölçeklenebilirlik açısından araştırılmalıdır.

Sürdürülebilirlik ve döngüsel tasarım: 3D baskılı tekstil ürünlerinin yaşam döngüsü analizleri yapılmalı; kullanım ömrü sonunda malzeme ayrıştırma ve geri dönüşümü kolaylaştıran tasarım stratejileri geliştirilmelidir.

Sonuç olarak, katmanlı üretim teknolojileri tekstil ve moda endüstrisinde henüz geleneksel üretim yöntemlerinin yerini alabilecek olgunlukta olmasa da, özellikle kişiselleştirilmiş ürünler, fonksiyonel tekstiller ve hibrit yapılar bağlamında güçlü bir tamamlayıcı teknoloji olarak konumlanmaktadır. Disiplinlerarası araştırmalar, malzeme bilimi odaklı yenilikler ve süreç standardizasyonu ile desteklendiğinde, 3D baskının tekstil endüstrisindeki rolünün önümüzdeki yıllarda daha belirgin ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşması beklenmektedir.

ETİK BEYAN

Bu kitap bölümünde yer alan bazı görsellerin hazırlanmasında Google'ın yapay zekâ tabanlı görsel üretim aracı (Gemini Nano Banana), metinlerin düzenlenmesi ve dil kontrolü amacıyla ise yapay zekâ tabanlı araçlar (Gemini 3.0 Pro) kullanılmıştır. Tüm kurgu, taslak hazırlığı yazara aittir. Oluşturulan içerik yazar tarafından gözden geçirilmiş ve doğrulanmıştır.

KAYNAKÇA

- Adanur, S., Jayswal, A., Griffin, K. O., & Hancock, J. L. (2024). Additive manufacturing of weft knitted and braided fabric structures with fused deposition modeling. *The Journal of The Textile Institute*, 115(6), 893-903. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2201910>
- Chatterjee, K., & Ghosh, T. K. (2020). 3D Printing of Textiles: Potential Roadmap to Printing with Fibers. *Advanced Materials*, 32(4), 1902086. <https://doi.org/10.1002/adma.201902086>

- Dehghani, M., & Goyal, P. (2022). Design and Development of Textile Fabrics Using 3D Printing Technology. *ECS Transactions*, 107(1), 19313. <https://doi.org/10.1149/10701.19313ecst>
- Diak, V., & Diak, A. (2024). Features and Limitations of Fused Deposition Modelling (FDM) in Obtaining Textile-like Structures. *Tekstilec*.
- Goncu-Berk, G., Karacan, B., & Balkis, I. (2020). Embedding 3D Printed Filaments with Knitted Textiles: Investigation of Bonding Parameters. *Clothing and Textiles Research Journal*, 40(3), 171–186. <https://doi.org/10.1177/0887302X20982927>
- Hossain, M. T., Shahid, M. A., Limon, M. G. M., Hossain, I., & Mahmud, N. (2024). Techniques, applications, and challenges in textiles for a sustainable future. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100230>
- Jayswal, A., & Adanur, S. (2022). An overview of additive manufacturing methods, materials, and applications for flexible structures. *Journal of Industrial Textiles*, 52, 1–42. <https://doi.org/10.1177/15280837221114638>
- Kabir, S., Li, Y., Salahuddin, M., & Lee, Y.-A. (2025). Drapability of 3D-Printed Auxetic Structure Textiles for Wearable Products Through the Digital Image Processing Technique. *Clothing and Textiles Research Journal*, 43(1), 48–64. <https://doi.org/10.1177/0887302X231202223>
- Keefe, E. M., Thomas, J. A., Buller, G. A., & Banks, C. E. (2022). Textile additive manufacturing: An overview. *Cogent Engineering*, 9(1), 2048439. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2048439>

• Lekeckas, K., Stirbe, J., Ancutiene, K., & Valusyte, R. (2023). Testing of 3D printing on textile fabrics for garments application within circular design. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 35(4), 627–647. <https://doi.org/10.1108/IJCST-06-2022-0080>

• Li, S. (2024). Development and application of fused deposition molding 3D printing technology in textile and fashion design. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 19, 1–18. <https://doi.org/10.1177/15589250241266977>

• Liu, J., Hu, L., Lui, K.-W., Wong, S. W.-f., & Jiang, S.-x. (2025). Design and characterization of breathable 3D printed textiles with flexible lattice structures. *Journal of Manufacturing Processes*, 141, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.062>

• Manaia, J. P., Cerejo, F., & Duarte, J. (2023). Revolutionising textile manufacturing: a comprehensive review on 3D and 4D printing technologies. *Fashion and Textiles*, 10(20). <https://doi.org/10.1186/s40691-023-00339-7>

• Omar, A. M., Perepa, R., Hassan, M. H., Daskalakis, E., Mirihanage, W., Bartolo, P. J. D. S., Mativenga, P., & Potluri, P. (2025). Drapeable and elastic 3D printed Polylactic Acid (PLA) textiles. *Materials Letters*, 398, 138943. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2025.138943>

• Sitotaw, D. B., Ahrendt, D., Kyosev, Y., & Kabish, A. K. (2020). Additive Manufacturing and Textiles—State-of-the-Art. *Applied Sciences*, 10, 5033. <https://doi.org/10.3390/app10155033>

• Sitotaw, D. B., Muenks, D., Kyosev, Y. K., & Kabish, A. K. (2025). Adhesion strength of 3D printed PLA on knitted fabrics and optimizing for improved performance. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 140, 103975. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2025.103975>

- Tümer, E. H., & Erbil, H. Y. (2021). Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review. *Coatings*, 11, 390. <https://doi.org/10.3390/coatings11040390>

- Zhao, Z., Liu, W., & Liu, H. (2025). Flexible and Durable Direct Ink Writing 3D-Printed Conductive Fabrics for Smart Wearables. *ACS Omega*, 10, 14138–14149. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11367>

BÖLÜM 5

ADDRESSING GREENWASHING IN THE TEXTILE SECTOR THROUGH DIGITAL PRODUCT PASSPORTS

1. Derya TAMA BİRKOCAK¹

2. Eda ACAR²

Introduction

The global textile industry is recognized as one of the most significant manufacturing sectors in the world economy and consists of a highly complex supply chain that extends from agriculture to retail (Nahid-Ull-Islam et al., 2025). Together with the energy and food industries, it is considered one of the fundamental components of human life (Adamkiewicz et al., 2022). As of 2024, the global textile and apparel market has reached an estimated value of around USD 535 billion, and it is projected to grow at a compound annual growth rate (CAGR) of 6.7% over the next decade, reaching approximately USD 986.5 billion by 2033 (CMI, 2025). Moreover,

¹ Assoc. Prof. Dr., Ege University, Textile Engineering Department, Orcid: 0000-0002-2720-2484

² Dr., Ege University, Textile Engineering Department, Orcid: 0000-0002-4468-5297

over the past 15 years, the volume of clothing produced worldwide has doubled, rising from 50 billion to 100 billion pieces (BHRRC, 2025).

The vast scale of the textile and fashion industries, however, comes with considerable environmental and social costs. The sector is responsible for a significant share of global carbon emissions and water consumption. In recent years, the growing environmental and social awareness among consumers has pushed companies in the textile industry to pay greater attention to sustainability. Textile brands increasingly position their products as “eco-friendly,” “sustainable,” or “ethical.” Yet, many of these claims are often made without sufficient evidence or transparency and can therefore be misleading. While some brands have genuinely invested in sustainable practices, others rely on superficial marketing efforts rather than actual transformation.

This has led to the widespread phenomenon of greenwashing, in which companies attempt to appear more responsible than they truly are. Such practices not only raise ethical concerns but also contribute to unfair competition within the market.

This book chapter examines the role of Digital Product Passports (DPPs) and advanced technological mechanisms in addressing greenwashing practices in the textile industry.

Definition of Greenwashing

Greenwashing refers to a company’s attempt to portray its environmental performance or sustainability efforts as better than they are, by making false, misleading, or exaggerated claims about its environmental practices (Khorsand et al., 2023). In this way, companies transform consumers’ demand for sustainability into a commercial advantage (Nahid-Ull-Islam et al., 2025).

Misleading actions in greenwashing can range from minor exaggerations to entirely fabricated claims. In particular, the textile sector's complex and non-transparent supply chains make greenwashing even more prevalent. According to data from the European Commission, 53% of green claims contain vague, misleading, or unsubstantiated information, while 40% lack any concrete evidence to support the claims (Alizadeh et al., 2024). The Fashion Transparency Index (FTI) 2023 report found that the average transparency score of 250 major fashion brands was only 26%, revealing that most brands operate with less than 50% transparency (Fashion Revolution, 2023).

The increasing number of sustainability claims in the textile and fashion industries has simultaneously created a consumer trust crisis. This crisis has caused consumers to become sceptical not only toward specific brands but also toward all products marketed as "sustainable." This phenomenon is referred to as green scepticism (Rausch & Kopplin, 2021). Various studies examining consumer trust in companies' green claims have shown a significant decline over time: the proportion of consumers who trust such claims dropped from 48% in 2009 and 39% in 2013 to only 20% by 2020 (Khorsand et al., 2023).

Classification of Greenwashing Claims

To identify and analyse greenwashing, misleading claims must first be categorized systematically. A widely accepted framework in the literature is the "Seven Sins of Greenwashing", developed by TerraChoice, an environmental marketing firm (de Freitas Netto, 2020; Nemes et al., 2022; Nahid-Ull-Islam et al., 2025).

Sin of the Hidden Trade-off: Making claims about a product's environmental performance while ignoring other significant

environmental impacts and focusing only on a narrow set of attributes.

1. *Sin of No Proof*: Making environmental claims that cannot be verified with easily accessible supporting information or credible third-party certification.
2. *Sin of Vagueness*: Using broad and poorly defined terms such as “all-natural,” “eco-friendly,” or “non-toxic,” which are open to misinterpretation by consumers.
3. *Sin of Worshipping False Labels*: Presenting a product as if it has been certified or endorsed by a legitimate third party when no such certification exists.
4. *Sin of Irrelevance*: Making a claim that is true but irrelevant to consumers seeking environmentally friendly products - for instance, advertising “CFC-free” products even though CFCs are legally banned.
5. *Sin of the Lesser of Two Evils*: Suggesting that a product is greener than others in its category while the category itself is environmentally harmful (e.g., organic cigarettes or eco-friendly pesticides).
6. *Sin of Fibbing*: Making entirely false or fabricated claims, such as claiming certification where none exists (de Freitas Netto, 2020; Nahid-Ull-Islam et al., 2025).

Researchers have further expanded this classification by developing fashion-specific conceptual frameworks. Alizadeh et al. (2024) proposed a five-indicator model that identifies signs of greenwashing in the fashion industry under five main categories: Misleading, Concealing, Vagueness, Overselling, and Irrelevance (Figure 1).

Figure 1 The Five-Indicator Model Developed by Alizadeh et al. (2024)

Misleading	Making statements that are false or cannot be verified.
Concealing	Highlighting the positive aspects while hiding the negative ones
Vagueness	Using ambiguous language to create green or sustainable associations.
Overselling	Exaggerating the significance or impact of certain actions.
Irrelevance	Presenting legally required or unrelated practices as if they were exceptional achievements.

Reference: prepared by authors

Digital Product Passports (DPPs)

The Digital Product Passport (DPP) is a mandatory digital record system developed under the European Union's Green Deal and the Circular Economy Action Plan (CEAP) to ensure the sustainability, traceability, and circularity of textile products (Abreu et al., 2025).

In line with the EU's Strategy for Sustainable and Circular Textiles, the goal is that by 2030, all textile products placed on the EU market will be durable, recyclable, and free from hazardous substances. The DPP serves as one of the key instruments enabling this transition (Domskienė & Gaidule, 2024).

The DPP is becoming a legal requirement under the Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) (Abreu et al.,

2025). This regulation aims to increase transparency across the supply chain, combat greenwashing, and enable consumers to make more informed purchasing decisions (Acciai & Pérez-Bou 2025).

Definition of the Digital Product Passport (DPP)

The textile and apparel industry is undergoing a significant transition from linear production structures to circular business models, in line with new European Commission regulations. The DPP as a mechanism designed to collect, store, and share data throughout the entire life cycle of a product lies at the centre of this transformation (Domskienė & Gaidule, 2024).

The DPP refers to a structured dataset that compiles detailed information about a product's components, materials, and chemical content, as well as data concerning repairability, spare part availability, and end-of-life management. This information is generated throughout all stages of the product's life cycle and can be utilized during design, production, use, and disposal. Furthermore, the DPP is a product-specific, digitally accessible dataset linked to a data carrier, which facilitates the electronic recording, management, and exchange of product-related information among supply chain actors, regulatory authorities, and consumers (Legardeur & Ospital, 2024).

The DPP acts as a central instrument for sharing data about a product's origin, composition, and chain of custody, ensuring a continuous flow of information across and beyond its life cycle (Jæger& Myrold, 2023). To support informed decision-making, the DPP may include the data categories presented in Figure 2.

Figure2 The Data Categories of DPP

Product Identification	A unique product identity or digital ID.
Product and Materials	Information on material origin and composition.
Use and Maintenance	Instructions for extending the product's lifespan.
Supply Chain and Reverse Logistics	Data covering the journey from manufacturing to retail and recycling.
Environmental Data	Product-level environmental footprint and compliance metrics.
Guidelines and Manuals	Repair, reuse, and recycling instructions.

Reference: prepared by authors

Through these datasets, the DPP has the potential to make the environmental and social impacts of products visible, traceable, and easily accessible (Jæger& Myrold, 2023). Moreover, it is closely linked to the Product Environmental Footprint (PEF) methodology and supports traceability and standardization for achieving greater social inclusiveness (Adamkiewicz et al., 2022).

The DPP in the European Union Strategy

The EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles aim for all textile products placed on the EU market by 2030 to be durable, recyclable, largely made from recycled fibres, and free from hazardous substances (Domskienė & Gaidule, 2024; Jæger& Myrold, 2023). This strategy seeks to combat fast fashion, reduce

textile waste, and address unethical labour conditions in production processes. In this context, the Digital Product Passport (DPP) is highlighted as a strategic and forward-looking initiative that enables the provision of clearer and more reliable information about textile products.

The European Commission intends to use the DPP as a tool to enhance product transparency and facilitate the transition to a circular economy within the EU market. According to current plans, the DPP is expected to become mandatory for all textile products sold in the EU market by 2030 (Jæger& Myrold, 2023).

Additionally, under the European Green Deal, the proposed Green Claims Directive aims to improve the transparency of environmental claims and eliminate misleading statements such as greenwashing (Alizadeh et al., 2024; Nahid-Ull-Islam et al., 2025).

Challenges in Integrating the DPP into the Textile Supply Chain

The integration of the Digital Product Passport (DPP) into the textile sector is a complex process involving multidimensional challenges related to data management, regulatory compliance, and supply chain coordination.

Global Supply Chain Structure and Operational Complexity

The broad and fragmented supply chain of the textile and fashion industries represents one of the main obstacles to DPP integration. Supply chain actors are often geographically dispersed, and differences in national regulations and legal systems further complicate implementation (Domskienė & Gaidule, 2024).

As seen in examples such as “Made in Italy,” a single production chain can involve more than 30 specialized small companies, each responsible for a specific stage of the process.

Integrating all these actors into a unified digital system significantly increases operational complexity (Acciai & Pérez-Bou 2025).

Transforming raw materials into finished garments involves multi-stage and technically demanding processes, which makes it difficult to establish a transparent system that verifies every step, material, and accessory along the chain. Another critical barrier is the high product volume in the global apparel market. Managing and maintaining traceability data for such a vast number of items over time is often described as an almost impossible task (Domskienė & Gaidule, 2024).

Data Standardization and Regulatory Uncertainty

Although many textile and fashion companies are ready to implement DPP systems, they are still waiting for legal and technical standards to be fully clarified. The absence of specific data requirements in existing regulations creates uncertainty in project planning (Domskienė & Gaidule, 2024; Acciai & Pérez-Bou 2025).

Another challenge is that production data are often stored across different, unconnected databases. The success of the DPP depends on the interoperability of these systems, yet clear guidelines on integration mechanisms are still lacking (Domskienė & Gaidule, 2024).

Furthermore, the question of where DPP data will be stored presents additional technical difficulties. Centralized systems are cheaper and easier to manage, whereas decentralized systems (e.g., blockchain), though more reliable, are costly and complex to maintain (Jæger& Myrøld, 2023).

Challenges for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs)

A significant gap exists between large corporations and SMEs in terms of their capacity to comply with DPP requirements. Although leading fashion brands have already initiated DPP

integration projects, full implementation has not yet been achieved (Jæger& Myrold, 2023).

On the other hand, SMEs face high initial costs for investments in technology, expertise, and training. In local production contexts, smaller enterprises often encounter limited access to digital infrastructure and difficulty adopting modern technologies (Acciai & Pérez-Bou 2025).

While large fashion brands can enforce sustainability standards among their suppliers, smaller firms lack the bargaining power to ensure similar compliance across their supply chains (Jæger& Myrold, 2023).

Strategic Risks and Data Transparency

The transparency provided by publicly accessible QR codes can also create strategic risks. Sensitive information regarding production processes, materials, and supplier networks may become visible to competitors, potentially leading to the disclosure of trade secrets (Acciai & Pérez-Bou 2025).

Technological and Infrastructural Challenges

Implementing DPP systems involves not only technical but also financial challenges. The establishment of data infrastructures, collection of product information, and long-term verification of data require significant resources (Jæger& Myrold, 2023; Domskienė & Gaidule, 2024).

Moreover, the fashion industry's technological readiness is still insufficient to meet ambitious sustainability targets. A major technical requirement is ensuring that the connection between the physical label and the digital data carrier remains readable throughout the entire product lifespan (Domskienė & Gaidule, 2024).

Although blockchain-based DPPs enhance transparency, they also bring disadvantages such as high energy consumption, data privacy concerns, and technical complexity (Abreu et al., 2025).

Challenges in the Context of the Circular Economy

In reverse supply chains (recycling and reuse), data exchange processes are still at a low level of maturity. Managers must redesign data flows to integrate reverse logistics into their operational systems (Jæger& Myrold, 2023).

A gradual transition to DPPs will not immediately reduce waste; on the contrary, increased emphasis on reuse and repair could result in more undocumented and untracked second-hand products entering the market (Domskienė & Gaidule, 2024).

In summary, while the integration of Digital Product Passports offers significant opportunities, it also involves a range of structural and practical challenges. The DPP should therefore not be viewed solely as a technological installation, but rather as a multi-layered transformation process encompassing legal, organizational, financial, and strategic dimensions.

Preventing Greenwashing Through the Digital Product Passport (DPP)

In recent years, the widespread use of greenwashing practices has resulted in a significant information overload and a crisis of trust among consumers. One of the main reasons for this issue is the absence of data-driven verification mechanisms to validate companies' subjective sustainability claims. Objective measurement systems are therefore essential to identify misleading statements and demonstrate environmental performance through quantifiable data.

The Digital Product Passport (DPP) helps address this problem by providing transparent, immutable, and accessible data to verify the sustainability claims of textile products. By ensuring the

traceability of materials and production processes, the DPP makes environmental performance measurable rather than declarative. In this book chapter, DPP-related data are categorized into three main areas: (1) Raw material verification, (2) production and environmental performance data, and (3) repair and recycling information.

Raw Material Verification Through the Digital Product Passport

One of the most common forms of greenwashing involves making false or unverifiable claims about the origin or composition of a product. The DPP addresses this issue by making such claims evidence-based through blockchain technology and digital certification systems. By documenting the journey of raw materials from their source to the final product, the DPP ensures full supply chain transparency (Alves et al., 2023; Abreu et al., 2025).

Sustainability certifications for raw materials used in the product are stored digitally within the DPP, enabling third-party verification of claims such as “sustainably sourced” (Abreu et al., 2025). Given the complexity of the textile supply chain, it is crucial that data be recorded not only at the product level but also at the batch or lot level, preventing loss of traceability during the production process (Alves et al., 2023).

Production and Environmental Performance Data Within the DPP

The environmental impacts of production processes are often obscured by ambiguous claims such as “eco-friendly” or “responsibly made.” The DPP reduces such ambiguity by integrating quantitative life-cycle-based metrics (LCA) that measure environmental performance using objective data (Alves et al., 2023). The key datasets under the DPP framework typically include

information on water management, energy and emissions, and chemical use (Table 1).

By quantifying these parameters, the DPP ensures that environmental impacts are based on measured values rather than assumptions, allowing both consumers and regulators to make data-driven comparisons between products (Alves et al., 2023).

Table 1 The key datasets under the DPP for production processes

Water Management Data	Total water consumption per product batch (m³).
	Volume and percentage of recycled water.
	Wastewater volume and pollutant load (COD - Chemical Oxygen Demand; BOD - Biochemical Oxygen Demand).
Energy and Emission Data	Total electricity consumption and share of renewable energy (%).
	Quantities of natural gas, steam, and other fuels used.
	Product-level carbon footprint (CO ₂ equivalent).
Chemical Use Data	Total volume of chemicals used.
	Presence of hazardous substances (SVHC – Substances of Very High Concern).
	Amount of chemicals recovered or recycled.

Reference: prepared by authors

Repair and Recycling Information Enabled by the DPP

Extending the lifespan of products plays a vital role in promoting a circular economy and reducing greenwashing risks. However, effective repair and recycling processes depend on access to accurate technical information about the product. The DPP facilitates this by incorporating datasets that support repairability, reuse, and recycling operations (Jæger& Myrold, 2023).

The following datasets are typically included in the DPP framework:

1. Schematics, exploded views, and technical documentation or manuals detailing how the product can be disassembled and reassembled for repair purposes.
2. The Bill of Materials (BOM) containing information about the materials used in the product, the presence of any hazardous substances, and whether components are standardized. This document is particularly important for recycling facilities, as it enables the correct separation and sorting of materials (Jæger& Myrold, 2023; Abreu et al., 2025).
3. Spare parts information, including data on which components can be replaced and where these parts can be obtained, supported by supplier and service network details.
4. Usage and maintenance data, including care instructions, guidelines for extending the product's lifespan, and explanations of potential error codes.

By including these datasets, the DPP not only enhances product circularity but also strengthens consumer trust, enabling verification of environmental and durability claims through transparent, verifiable information.

Conclusions and Future Perspectives

A comprehensive analysis of the current state of the textile and fashion industry reveals that the sector stands at a critical turning point in terms of sustainability, transparency, and ethical responsibility. The widespread presence of greenwashing practices has led to a profound crisis of trust among consumers and

stakeholders, making new regulatory frameworks and technological solutions essential for shaping the future of the industry.

The textile sector is now transitioning from a linear “take-make-dispose” model toward a circular and data-driven ecosystem. Within this transformation, the Digital Product Passport (DPP) and data science emerge as the most powerful tools for substantiating sustainability claims and addressing greenwashing. By enabling the collection and exchange of data throughout the entire product life cycle, the DPP provides a concrete mechanism against greenwashing practices rooted in lack of proof and vagueness. When supported by blockchain technology, it ensures the immutability of data and transparency across the supply chain. However, the effectiveness of such a system depends heavily on reliable data management and third-party verification mechanisms. This, in turn, allows consumers to directly view the environmental impact of products, encouraging informed purchasing behaviour and enhancing brand accountability.

Looking ahead, both regulatory frameworks and consumer expectations will drive brands away from marketing-based sustainability claims toward a model of data-backed and verifiable transparency. Under the European Union’s new regulations, environmental claims must be supported by scientific evidence, ensuring visibility across all stages - from raw material production to the final product.

Today, legislative developments and conscious consumer demand have made transformation in the textile industry inevitable. The sector must now move toward a structure where resources are preserved, the circular economy is embraced, and greenwashing is actively prevented. At this point, data science and digital tools play a central role as mechanisms for detecting and preventing misleading sustainability claims.

In conclusion, the sustainable future of the textile industry will largely depend on the adoption and effective use of these technologies, ensuring a transparent, accountable, and truly circular system for the years ahead.

References

Abreu, H., Pereira, V., & Barata, J. (2025). Blockchain-based digital product passport: Design principles and demonstration. *International Journal of Production Research*, (1–20).

Acciai, E., & Pérez-Bou, S. (2025). Exploring the role of digital product passports for supply chain traceability in the “Made in Italy” textile sector. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, (1–17).

Adamkiewicz, J., Kochańska, E., Adamkiewicz, I., & Łukasik, R. M. (2022). Greenwashing and sustainable fashion industry. *Current opinion in green and sustainable chemistry*, 38, 100710.

Alizadeh, L., Liscio, M. C., & Sospiro, P. (2024). The phenomenon of greenwashing in the fashion industry: A conceptual framework. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101416.

Alves, L., Sá, M., Cruz, E. F., Alves, T., Alves, M., Oliveira, J., Santos, M. & Rosado da Cruz, A. M. (2023). A traceability platform for monitoring environmental and social sustainability in the textile and clothing value chain: Towards a digital passport for textiles and clothing. *Sustainability*, 16(1), 82.

BHRRC Business & Human Rights Resource Centre. (2025). The missing thread: Human rights risks and impacts in the global garment industry. Retrieved June 26, 2025, from https://media.business-humanrights.org/media/documents/BHRRC_The_Missing_thread_report_June_2025.pdf

Custom Market Insights. (2025). Textile and apparel market. Retrieved November 26, 2025, from <https://www.custommarketinsights.com/report/textile-and-apparel-market/>

de Freitas Netto, S. V., Sobral, M. F. F., Ribeiro, A. R. B., & Soares, G. R. D. L. (2020). Concepts and forms of greenwashing: A systematic review. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 19.

Domskienė, J., & Gaidule, E. (2024). An overview of technological challenges in implementing the digital product passport in the textile and clothing industry. *AUTEX Research Journal*, 24(1), 20240002.

Fashion Revolution, (2023), Fashion Transparency Index 2023: Press Release. Fashion Revolution, London. Retrieved November 20, 2025, from https://issuu.com/fashionrevolution/docs/fashion_transparency_index_2023_pages?fr=xKAE9_zU1NQ

Jæger, B., & Myrøld, S. (2023). Textile industry circular supply chains and digital product passports: Two case studies. In E. Alfnes, A. Romsdal, J. O. Strandhagen, G. von Cieminski, & D. Romero (Eds.), *Advances in production management systems: Production management systems for responsible manufacturing, service, and logistics futures* (pp. 350–366). Springer.

Khorsand, D. B., Wang, X., Ryding, D., & Vignali, G. (2023). Greenwashing in the fashion industry: Definitions, consequences, and the role of digital technologies in enabling consumers to spot greenwashing. In *The Garment Economy: Understanding History, Developing Business Models, and Leveraging Digital Technologies* (pp. 81-107). Cham: Springer International Publishing.

Legardeur, J., & Ospital, P. (2024). Digital product passport for the textile sector (Doctoral dissertation). Parlement Européen.

Nahid-Ull-Islam, M., Hasan, M., Md, S., Hassan Chowdhury, M. K., & Akter, M. (2025). Greenwashing and bluewashing in the textile industry: causes, consequences, and solutions for sustainable fashion. *Textile Industry/Tekstilna Industrija*, 73(1).

Nemes, N., Scanlan, S. J., Smith, P., Smith, T., Aronczyk, M., Hill, S., Lewis, S.L., Montgomery A.W., Tubiello F.N. & Stabinsky, D. (2022). An integrated framework to assess greenwashing. *Sustainability*, 14(8), 4431.

Rausch, T. M., & Kopplin, C. S. (2021). Bridge the gap: Consumers' purchase intention and behavior regarding sustainable clothing. *Journal of cleaner production*, 278, 123882.

